



UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Centro de Ciências da Matemática e da Natureza

Instituto de Geociências

Departamento de Geologia

**Reconhecimento de alvos potencialmente mineralizados a
Ouro em rochas hidrotermalmente alteradas, utilizando
imagens ASTER, na região centro-sul do
Rio Grande do Sul, Brasil.**

Trabalho Final de Curso
(IGL-U08)

LUCAS DOS ANJOS CORREA DO ESPIRITO SANTO

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Sícoli Seoane
Orientador: Prof. Dr. Everton Marques Bongioiolo

Rio de Janeiro

Maio de 2018



UFRJ

LUCAS DOS ANJOS CORREA DO ESPIRITO SANTO

**Reconhecimento de alvos potencialmente mineralizados a
Ouro em rochas hidrotermalmente alteradas, utilizando
imagens ASTER, na região centro-sul do
Rio Grande do Sul, Brasil.**

Trabalho Final de Curso de Graduação
em Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do
Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado
como requisito necessário para
obtenção do grau de Geólogo.

Orientador(es):

Prof. Dr. José Carlos Sícoli Seoane

Prof. Dr. Everton Marques Bongioiolo

Rio de Janeiro

Maio de 2018

ESPIRITO SANTO, Lucas dos Anjos Correa

Reconhecimento de alvos potencialmente mineralizados a Ouro em rochas hidrotermalmente alteradas, utilizando imagens ASTER, na região centro-sul do Rio Grande do Sul, Brasil./ Lucas dos Anjos Correa do Espírito Santo - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2018.
51.: il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) –
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Instituto de Geociências, Departamento de
Geologia, 2018.

Orientadores: José Carlos Sícoli Seoane; Everton
Marques Bongioiolo;

1. Geologia. 2. Geologia Econômica – Trabalho de Conclusão de Curso. I. José Carlos Sícoli Seoane; Everton Marques Bongioiolo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Reconhecimento de alvos potencialmente mineralizados a Ouro em rochas hidrotermalmente alteradas, utilizando imagens ASTER, na região centro-sul do Rio Grande do Sul, Brasil.

LUCAS DOS ANJOS CORREA DO ESPIRITO SANTO

**Reconhecimento de alvos potencialmente mineralizados a
Ouro em rochas hidrotermalmente alteradas, utilizando
imagens ASTER, na região centro-sul do
Rio Grande do Sul, Brasil.**

Trabalho Final de Curso de Graduação
em Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do
Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado
como requisito necessário para
obtenção do grau de Geólogo.

Orientador(es):

Prof. Dr. José Carlos Sícoli Seoane

Prof. Dr. Everton Marques Bongioiolo

Aprovada em 29 de Junho de 2018.

Por:

Orientador: Dr. José Carlos Sícoli Seoane

Coorientador: Dr. Everton Marques Bongioiolo

Banca: Dr. Atlas Vasconcelos Correa Neto

Banca: Dr. Claudio Gerheim Porto

Suplente: Dr. Gustavo Luiz Campos Pires

Rio de Janeiro

Maio de 2018

AGRADECIMENTO

Agradeço:

A minha família por todo o apoio, suporte e conselhos que me deram ao longo dessa jornada. Em especial meus pais, Isabel Cristina e Marco Antonio, minha irmã Maria Luisa, minhas avós Adelaide e Wilma, meus tios maternos e paternos e minha dinda Jane.

A José Leal, um dos primeiros geólogos formados pela UFRJ, por ter esclarecido e me incentivado a fazer Geologia quando prestei o vestibular.

Aos meus orientadores José Carlos Sícoli Seoane e Everton Marques Bongiolo, pelo conhecimento passado, pela amizade e orientação neste trabalho e ao longo desses 5 anos de graduação.

Ao UFRJ SEG Student Chapter, capítulo que tive o prazer de participar nos últimos dois anos, onde pude experimentar e aprender mais sobre Geologia Econômica.

As minhas amigas Karina Langkjer e Nicoli Schwaab, que mesmo sendo de outros cursos, me incentivaram e encheram de ideias e risadas nos momentos difíceis.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a turma de Geologia UFRJ 2013, a melhor do Fundão!!! Em especial a Juliana Afonso, Larissa Santana e Rafael Martins, amigos e companheiros na maioria das atividades de campo.

RESUMO

O uso de imagens de satélite aplicadas a prospecção mineral é uma forma rápida e relativamente de baixo custo, para a identificação de áreas potencialmente mineralizadas. A análise parte do princípio que conhecendo os minerais associados as mineralizações (os minerais farejadores), seus entornos (chamados de “envelopes”) e suas assinaturas espectrais, é possível criar mapas de abundância, identificando áreas anômalas que possam estar mineralizadas. A disponibilidade de imagens do sensor ASTER, com boa resolução espacial (30m a 60 m de pixel nas bandas do visível e infravermelho) combinado ao uso de softwares de GIS, refinam o mapeamento dessas anomalias, pois permitem a interpretação segundo controles litológicos e estruturais, facilitando assim sua investigação em campo. A área localizada na porção centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul é composta por duas cenas ASTER, se estendendo de Bagé (SW) até Caçapava do Sul (NE) e tendo Lavras do Sul como ponto central. Diversas minas e garimpos são conhecidos na região e próximos a ela, e foram utilizadas, juntamente com os dados encontrados na bibliografia, como pontos de controle para avaliar a efetividade da técnica empregada. Trabalhos precedentes na área reconheceram que as mineralizações próximas a cidade de Lavras do Sul, ocorrem associadas a sobreposição de eventos hidrotermais dos tipos pórfiro e epitermal. A mineralogia característica de cada tipo de alteração também foi descrita, e foi utilizada para a escolha de seis minerais índices. A aplicação da técnica de Análise por Principais Componentes em imagens ASTER tinha como objetivo a identificação de áreas hidrotermalmente alteradas, possivelmente mineralizadas com Au e Cu, ajudando a encontrar novos depósitos, além de identificar os já conhecidos. A técnica investiga a correlação entre as quatro bandas espectrais características dos minerais índices, gerando quatro novas bandas (PC's). De forma geral as últimas bandas concentram as informações menos comuns, que representam justamente as informações de interesse para a exploração mineral neste caso são as bandas PC3 e PC4. A partir da estatística de cada PC, foram definidos intervalos de intensidade, para descobrir o que era anômalo e o que era background. Esses intervalos foram definidos por $\frac{1}{2}$ desvio padrão, resultando em 12 ou 13 classes para cada mineral, as quais as extremas foram selecionadas. As áreas anômalas foram definidas pela concentração de três ou mais minerais índice. A análise preliminar resultou em áreas anômalas, que foram interpretadas segundo três parâmetros: a presença dos minerais índices, a litologia de ocorrência e a presença de estruturas geológicas (falhas/fraturas). Posteriormente foi feita uma reavaliação das anomalias e seu ranqueamento, para identificar os alvos mais interessantes. Para a maioria dos casos, a técnica foi efetiva, reconhecendo áreas já conhecidas e indicando o potencial de novas áreas. O alvo com melhor resposta foi Cerrito do Ouro, pois anomalias caíram em cima de depósitos conhecidos em uma região mapeada pela CPRM como com grande potencial aurífero.

ABSTRACT

The use of satellite imagery applied to mineral prospecting is a quick and relatively low-cost way to identify potentially mineralized areas. The analysis assumes that knowing the mineral assemblage associated with the mineralization (the pathfinder minerals), their contour (called "envelopes") and their spectral signatures, it is possible to create maps of abundance, identifying anomalous areas that may be mineralized. The availability of ASTER sensor images, with good spatial resolution (30m) combined with the use of GIS software, refines the mapping of these anomalies, as they allow interpretation according to lithological and structural controls, thus facilitating their field investigation. The area located in the south-central portion of the Rio Grande do Sul State, Brazil, is composed of two ASTER scenes, extending from Bagé (SW) to Caçapava do Sul (NE) and having Lavras do Sul as the central point. Several mines (legal and irregular) are known in the region and close to it, and were used, together with the data provided by the bibliography, as control points to evaluate the effectiveness of the technique employed. Previous works in the area have recognized that the mineralization near the city of Lavras do Sul, occur associated with the overlap of hydrothermal events of the porphyry and epithermal types. The mineralogy characteristic of each type of alteration was also described, with six index minerals chosen. The application of the Principal Component Analysis technique in ASTER images was aimed to identify hydrothermally altered areas, possibly mineralized with Au and Cu, finding new deposits, as well as to spot those already known. The technique investigates the correlation between the four spectral bands characteristic of the index minerals, generating four new bands (PC's). In general, the last bands concentrate the less common information, which represents exactly the information of interest for the mineral exploration in this case are the bands PC3 and PC4. From the statistics of each PC, intervals of intensity were defined, to find out what was anomalous and what was background. These intervals were defined by $\frac{1}{2}$ standard deviation, resulting in 12 or 13 classes for each mineral, which the edges were selected. The anomalous areas were defined by the concentration of three or more index minerals. The first analysis resulted in anomalous areas, which were interpreted according to three parameters: the presence of index minerals, the lithology and the presence of geological structures (faults / fractures). Subsequently a reassessment of the anomalies and their rankings were made to identify the most interesting targets. In most cases, the technique was effective, recognizing areas already known and indicating the potential of new areas.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Minerais e suas respectivas bandas ASTER características.	11
Tabela 2: Representação dos minerais em cores.....	12
Tabela 3:Tabela de anomalias	12
Tabela 4:Tipos de depósitos minerais associados ao magmatismo em arcos vulcânicos, modificado de Bongiolo (2006).....	15
Tabela 5:Resumo dos sistemas Epitermais de Alta e Baixa Sulfetação, modificada de Robb (2005).....	21
Tabela 6:Divisão do Espectro Eletromagnético de acordo com a nomenclatura usada para cada comprimento de onda, e detalhe para a divisão das cores no visível. Observações: $1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$, $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$, $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$. Tabela modificada de Meneses & Almeida (2012).....	25
Tabela 7: Características do sensor ASTER. Modificado de Kafino (2009)	27
Tabela 8: Resumo dos eventos em cada compartimento do Escudo Sul-Rio- Grandense (ESRG), extraído de Borba (2006).	31
Tabela 9: Tabela de anomalias	41
Tabela 10: Tabela de anomalias, suas áreas e relevância em porcentagem da área total.	41

ÍNDICE DE SIGLAS

RELATIVAS AO SENSOR:

ASTER Radiômetro espacial
avançado de reflexão e emissão
termal

VNIR visível e Infravermelho
próximo

SWIR infravermelho de ondas
curtas

TIR infravermelho termal

APC ou PCA!!

ORGANIZAÇÕES:

CPRM Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DNPM Departamento Nacional de Produção Mineral

METI Ministério da Economia, Comércio e Indústria
do Japão

NASA Agência espacial Americana

UFRJ Universidade Federal do Rio de Janeiro

USGS Serviço Geológico dos Estados Unidos

RELATIVAS A GEOLOGIA:

ABM Anfibólio-Biotita Monzogranito

AVPSS Associação Vulcano-Plutono-Sedimentar Seival

BAS Biotita-Anfibólio Sienogranito

BG Biotita Granodiorito

CILS Complexo Intrusivo Lavras do Sul

DALS Distrito Aurífero Lavras do Sul

ESRG Escudo Sul-Rio-Grandense

F/R Razão Fluido-Rocha

GJ Granito Jaguari

GL Granito Lavras

MAJ Monzodiorito Arroio do Jacques

MT Monzonito Tapera

PG Pertita granito

QMP Quartzo Monzonito Porfirítico

TTG Tonalito, Trondhjemito, Granodiorito

ZCTDC Zona de Cisalhamento Transversal Dorsal do Canguçu

UNIDADES:

Å Ångström

cm centímetro

m metro

km quilômetro

Ma Milhão de anos

Ga Bilhão de anos

Mb. Membro

Fm. Formação

Gp. Grupo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Delimitação da área de estudo.	2
Figura 2: A) Mapa dos Biomas do Rio Grande do Sul (IBGE e MMA, 2004); B) Coxilhas, imagem disponível em: http://geografiabemfacil.blogspot.com/2016/10/caracteristicas-gerais-da-regiao-sul-do.html	3
Figura 3: Dados de pluviosidade modificados do site do Instituto Nacional de Meteorologia- INMET, para a cidade de Santa Maria, cerca de 100km do centro da área. Em vermelho, destaca-se as datas com maior índice de pluviosidade (25 e 26 de outubro) e a data em que as imagens foram adquiridas pelo satélite (28 de outubro). (http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf)	7
Figura 4: Mapa da área de estudos em Falsa cor (RGB 231) e sua posição em relação ao Estado do Rio Grande do Sul.....	8
Figura 5: A) Bandas espectrais dos minerais e B) bandas espectrais convolvidas para as bandas ASTER.....	10
Figura 6: Mapa mostrando as principais regiões com depósitos de Cobre e Molibdênio Pórfiro, modificado de Evans(1993).....	16
Figura 7: Alterações hidrotermais ao redor de uma intrusão porfírica. Lowel & Gilbert (1970) modificado por Bongioiolo (2006)	17
Figura 8: Processos que ocorrem em sistemas vulcânico-hidrotermal e geotérmico. Onde ocorrem depósitos epitermais de alta e baixa sulfetação, associados a uma fonte de calor que pode gerar depósitos do tipo pórfiro. Traduzido de Hedenquist & Lowenstern (1994) por Bongioiolo (2006)	20
Figura 9: Modelo esquemático da evolução dos eventos magmáticos-hidrotermais no Distrito Aurífero de Lavras do Sul. Traduzido de Bongioiolo <i>et al.</i> (2011).	22
Figura 10: O Espectro Eletromagnético: suas subdivisões de acordo com frequência e comprimento de onda. Disponível em: http://www.apoioescolar24horas.com.br/salaaula/estudos/fisica/035_ondas/#pag4-tab	24
Figura 11: A) Lançamento do Satélite Terra (EOS-AM1) em 18 de dezembro de 1999. Imagem disponível em: https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=499 . B) Detalhe do Satélite Terra e localização dos sensores. Imagem disponível em: https://www.nasa.gov/mission_pages/terra/spacecraft/index.html	26
Figura 12: Localização das bandas espectrais do sensor ASTER no espectro de transmissão atmosférica. Modificado de Wahi et al. (2013).....	27
Figura 13: Domínios tectônicos do Rio Grande do Sul, CPRM (2006) modificado por Travassos (2014)	29
Figura 14: Mapa geológico mostrando os quatro domínios: Taquarém, São Gabriel, Tijucas (Santana da Boa Vista) e Pelotas. Dando destaque a Bacia de Camaquã, no centro da figura. Extraído de Borba (2006).	34
Figura 15: Mapas Geológicos do CILS: a) mapa simplificado da região de Lavras do Sul, unidades e idades; b) mapa geológico do Complexo Intrusivo Lavras do Sul. Ambos extraídos de Gastal et al. (2015).....	36
Figura 16: Mapa de diques e ocorrências minerais ao redor do CILS. Extraído de Gastal et al. (2015)	38
Figura 17: Falsa Anomalia Lavras do Sul	42
Figura 18: Falsa Anomalia Bagé	42
Figura 19: Falsa Anomalia lagos.....	43
Figura 20: Falsa Anomalia- lagos em área anômala	43
Figura 21 A e B: anomalias em Minas de calcário.....	44
Figura 22: Áreas anômalas próximas a Cerrito do Ouro, com grande potencial para mineralização.	45
Figura 23: Áreas anômalas sobre a Junção dos Mapas Geológicos da CPRM: Folhas Bagé (NW) e Lagoa da Meia Lua (SW) na escala 1:125.000 e Folhas Cachoeiro do Sul (NE) e Pedro Osório (SE) na escala 1:250.000	46

Sumário

AGRADECIMENTO.....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE DE TABELAS	ix
ÍNDICE DE SIGLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
CAP 1--- INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos e motivo da área	2
1.2 Localização e acessos	2
1.3 Aspectos fisiográficos	3
CAP 2---Etapas do Trabalho	4
2.1 Revisão bibliográfica	4
2.1.1 Análise por Principais Componentes (APC).....	4
2.2 Pré-processamento	7
2.2.1 Escolha das Imagens.....	7
2.2.2 Pré Processamento.....	8
2.3 Processamento	10
2.3.1 A Escolha das Anomalias.....	12
CAP 3 --- REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1 Sistemas Hidrotermais	13
3.1.1 A Origem dos Fluidos	13
3.1.2 Sistema Pórfiro.....	16
3.1.3 Sistema Epitermal	19
3.2 Sensoriamento Remoto	23
3.2.1 Introdução.....	23
3.2.2 Conceitos de Sensoriamento Remoto.....	23
3.2.2 Sensor ASTER.....	26
CAP 4 --- Geologia Regional e Contexto Geotectônico.....	29
4.1 Geologia da área	31
4.2 Histórico de mineralizações	40
CAP 5 --- RESULTADO E DISCUSSÃO	41
As “Falsas Anomalias”	42
Alvos em potencial	45
CAP 6 --- CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXOS	0

CAP 1--- INTRODUÇÃO

A combinação de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento são uma grande ferramenta para identificação de feições e mapeamento geológico. Com o avanço das tecnologias, a disponibilidade de dados e tecnologia de ponta em domínio público é cada vez mais frequente. Isso facilita a pesquisa mineral, visto que agiliza o processo de investigação, pré-mapeando áreas a serem exploradas por uma equipe. Desta forma minimizando os gastos na fase exploratória e permitindo que mais locais sejam investigados em menor tempo e custos.

Desde seu lançamento em 1999 o sensor multiespectral ASTER contribui para diversos estudos, entre eles sobre vegetação, climatologia, hidrologia, prevenção de desastres naturais, modelos digitais de elevação (DEMs), solos, geologia e outros. Com 14 bandas espalhadas entre as faixas do visível e do infravermelho termal do espectro eletromagnético (VNIR, SWIR e TIR), coleta dados de alta resolução espacial (Crósta, 2009).

Na geologia, esses dados têm obtido resultados promissores na caracterização de minerais associados a depósitos minerais e mapeamento geológico, tais como Ducart (2007), Kafino (2009), Seoane *et al.* (2009), Santos *et al.* (2010), Viana (2012) e outros. Sua eficácia é maior sobretudo em áreas áridas, com pouca ou nenhuma vegetação.

Sua vantagem em relação a sensores espectrais anteriores como o ETM+ Landsat se dá por sua melhor distribuição das bandas (melhor resolução espectral), permitindo detecção mais precisa justamente nas bandas de absorção características de muitos minerais de alteração, relacionados a depósitos minerais.

A área de estudos apresenta várias minas, depósitos e garimpos de Au, principalmente na região de Lavras do Sul, onde os trabalhos de Bongioiolo (2006), Bongioiolo *et al.* (2008, 2011) reconheceram a assembleia mineralógica de cada fácies hidrotermal, e Viana (2012), que, usando imagens disponíveis na época, conseguiu bons resultados aplicando a técnica de análise por principais componentes.

Utilizando os conhecimentos desses autores e outros que serão citados ao longo do texto, esta monografia apresenta dados que podem auxiliar a prospecção mineral, identificando novas áreas e reconhecendo o potencial de outras já conhecidas, através da aplicação da mesma técnica em cenas ASTER que receberam melhor pré-processamento e abrangem uma área maior.

1.1 Objetivos e motivo da área

O objetivo desse trabalho é a identificação de áreas hidrotermalmente alteradas, potencialmente mineralizadas com Au e Cu na região centro-sul do Escudo Sul- Rio-Grandense (RS), a partir da utilização da técnica de Análise por Principais Componentes (APC ou PCA na sigla original em inglês) em imagens ASTER. Diversas minas e garimpos são conhecidos na área e próximos a ela. Juntamente com os dados encontrados na bibliografia foram utilizadas como pontos de controle para testar a efetividade da técnica empregada.

O que motivou o trabalho foi a oportunidade de utilizar técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento para a Geologia Econômica, numa importante área de riquezas minerais do Rio Grande do Sul, que devido a distância é uma região pouco explorada em trabalhos da graduação de Geologia da UFRJ.

1.2 Localização e acessos

A área de estudo possui cerca de 6831 km², englobando parcialmente dez municípios na porção central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 1). São eles: Bagé, Candiota, Caçapava do Sul, Dom Pedrito, Hulha Negra, Lavras do Sul, Santa Margarida do Sul, São Gabriel, São Sepé e Vila Nova do Sul.

No centro da área, a cidade de Lavras do Sul, distante cerca de 320km de Porto Alegre, pode ser acessada através das rodovias: RS-357 que liga até a cidade de Caçapava do Sul, e a BR-473 que liga a São Gabriel à norte e Bagé à sul. Outras rodovias que cortam a área são as BR-153, BR-290, BR-392 e RS-149.

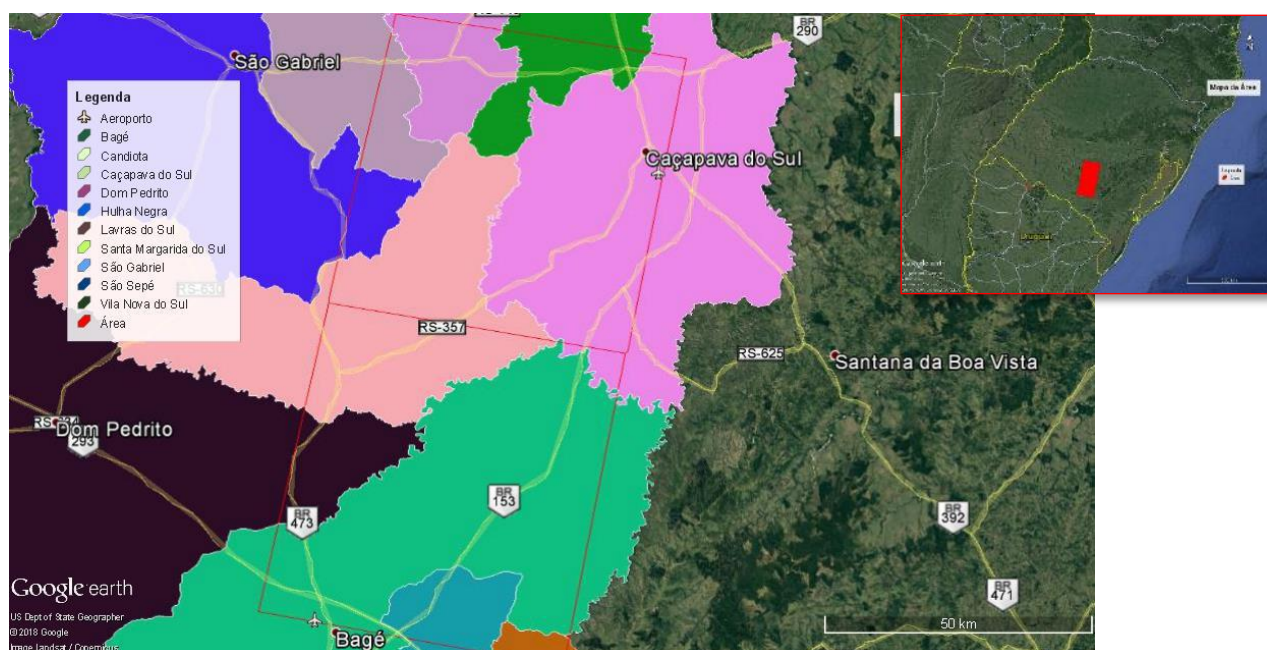


Figura 1: Delimitação da área de estudo. As cores representam cada município que esteja parcialmente incluso na área. Imagem Google Earth Pro 2015, obtidas pelos satélites Landsat/Copernicus em 2018.

1.3 Aspectos fisiográficos

Segundo o IBGE a região está inserida no bioma dos Pampas (Figura 2A), também chamado de campos sulinos ou pampas gaúchos. É caracterizado por uma vegetação composta basicamente por gramíneas e espécies vegetais de pequeno porte. Frizzo (2002) classifica esses campos como savana, subdividindo-a em três: Savana Arbórea Aberta com gramíneas, árvores de pequeno porte e arbustos; Savana Parque, também com gramíneas, só que as espécies arbustivas-arbóreas apresentam-se isoladas ou pouco agrupadas; e Savana Gramíneo-lenhosa, mais extensa, tem predomínio de gramíneas e árvores isoladas ou em forma de capões (mata redonda cercada por campos).

O relevo é composto principalmente por planícies e coxilhas (colinas localizadas em regiões de campos) (Figura 2B). O clima é classificado como subtropical úmido, caracterizado por chuvas bem distribuídas durante o ano todo, com valores médios anuais entre 1300 e 1600mm, com temperaturas médias entre 16 e 19°C, sendo que a média das máximas alcança os 30°C e média das mínimas abaixo dos 10° C (Frizzo, 2002).

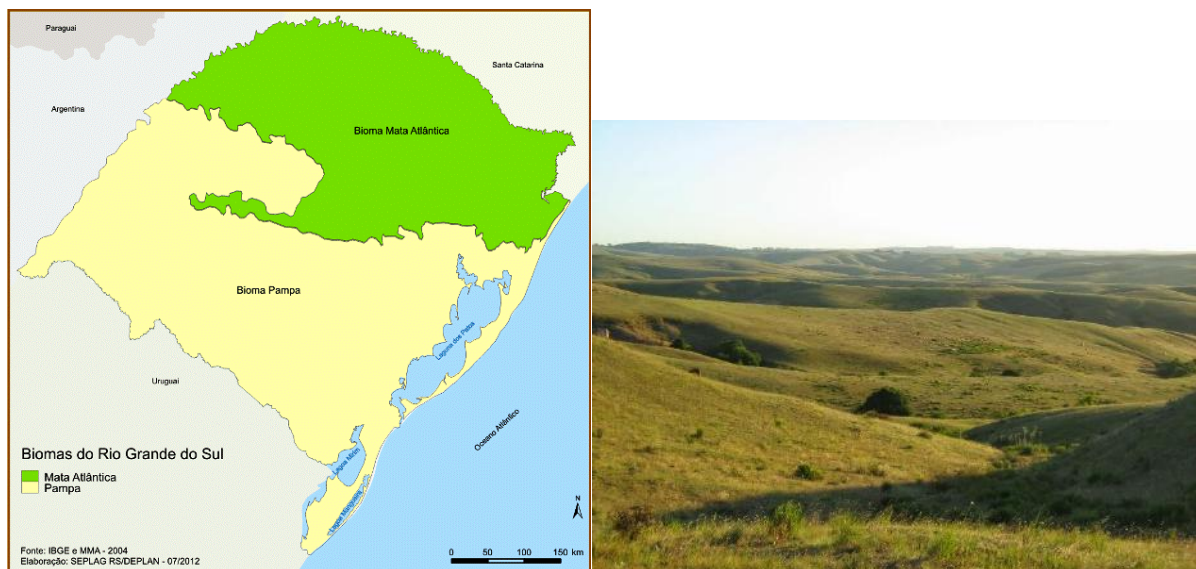


Figura 2: A) Mapa dos Biomas do Rio Grande do Sul (IBGE e MMA, 2004); b) Coxilhas, imagem disponível em: <http://geografiabemfacil.blogspot.com/2016/10/caracteristicas-gerais-da-regiao-sul-do.html>

CAP 2---Etapas do Trabalho

Para atingir os objetivos deste trabalho foram necessárias as seguintes etapas: Revisão bibliográfica, pré-processamento, processamento

2.1 Revisão bibliográfica

Esta etapa constituiu da compilação de dados e revisão bibliográfica sobre a área de estudo, o sensor e a técnica empregada, sobretudo em artigos, teses, relatórios e sites governamentais, como os da NASA, USGS e CPRM.

Duas cenas (área imageada a cada visada do satélite) ASTER foram adquiridas gratuitamente no site EarthExplorer da USGS, servindo de base para o trabalho. Quatro mapas geológicos realizados pela CPRM, correspondentes as folhas Cachoeira do Sul e Pedro Osório, na escala 1:250.000 e as folhas Bagé e Lagoa da Meia Lua, na escala 1:100.000, foram obtidos no site da mesma instituição, sendo usados para a identificação das litologias e estruturas que pudessem estar associados as anomalias encontradas.

2.1.1 Análise por Principais Componentes (APC)

A espectroscopia de reflectância é uma técnica analítica que usa a energia eletromagnética refletida nas regiões do VNIR e SWIR com o objetivo de obter informações sobre a composição mineralógica e química de materiais. Suas maiores vantagens são o fato de reconhecer materiais cristalinos e amorfos e também possibilidade de se usar em diferentes escalas, desde próximo (como em laboratório) até muito longe (em satélites), além de ser uma técnica não destrutiva que pode ser aplicada em amostras com pouca ou nenhuma preparação (Clark, 1999).

Também chamada de espectroscopia de imageamento (*imaging spectroscopy*) e “sensoriamento multiespectral” (*multispectral remote sensing*), a técnica mede quantitativamente a assinatura espectral dos objetos, que podem ser comparados diretamente com espectros medidos no campo ou em laboratório (Ducart *et al.*, 2005) e ajudar na identificação de minerais.

O processo de detecção mineral através de dados de sensores multiespectrais explora o fato de que muitos minerais apresentam bandas de absorção (Markoski, 2006), comumente na região do VNIR, associadas principalmente a água, hidroxila, carbonatos e óxidos e hidróxidos de ferro. Isso produz curvas espectrais características para cada mineral ou agregado de minerais. Quanto melhor a resolução espectral do sensor, mais facilmente as feições são identificadas.

A energia ao incidir sobre uma superfície terá uma parte absorvida e outra parte espalhada. É justamente a dispersão/espalhamento que possibilita a espectroscopia de reflectância funcionar, pois ao refletir de volta para o sensor pode-se detectar o alvo. Contudo, a dispersão também atrapalha, pois quando ocorre de forma aleatória prejudica a recuperação de informações.

Principalmente no VNIR o tamanho das partículas afeta a quantidade de luz (energia) que será espalhada (dispersa) e absorvida. Grãos maiores tendem a absorver mais do que espalhar, enquanto que grãos menores, por possuírem maior superfície de contato, têm mais superfícies de reflexão e, portanto, espalham mais do que absorvem. Visto que espalhamento é controlado pela reflexão na superfície e imperfeições internas, a reflectância diminui quando o tamanho do grão aumenta.

Ao observar as bandas de um sensor pode-se perceber uma semelhança entre elas, principalmente entre as bandas contíguas da mesma região espectral. Esse fato se chama correlação de bandas e mostra que há redundância de dados, o que pode ser prejudicial a interpretação ao diminuir o contraste entre as feições. Sabendo que a correlação nem sempre é de 100%, pode-se afirmar que sempre haverá um mínimo de informação não redundante que é interessante, e normalmente o alvo de quem usa a técnica para exploração mineral.

Dois fatores são a causa da correlação, o sombreamento topográfico (que afeta igualmente todas as bandas) e a relação entre a presença de materiais com espectros de reflectância próximos e as bandas espectrais do sensor (as imagens com comprimentos de onda parecidos serão semelhantes entre si).

A técnica de Análise por Principais Componentes foi desenvolvida com o intuito de eliminar essa alta correlação entre as bandas, com o mínimo de perda de informação, preservando assim os dados de interesse. Uma de suas vantagens é que a técnica dispensa a necessidade de correção atmosférica para sensores multiespectrais (Crósta *et al.*, 2009).

A APC analisa as correlações entre imagens sem qualquer processamento, produzindo um novo conjunto com mesmo número de imagens, sem correlação entre si. De forma geral, a PC1 contém a informação que é comum a todas as bandas originais, a PC2 irá conter a feição espectral mais significativa do conjunto e assim sucessivamente. As PCs de ordem mais alta irão conter feições espectrais cada vez menos significantes, até a última PC, que concentrará então a informação que sobrar (Crósta A. P., 1992). Normalmente as últimas PCs são descartadas por concentrarem o ruído. Contudo, essas últimas bandas podem representar justamente a informação de interesse, principalmente quando se trata de feições espectrais relacionadas a minerais indicativos da presença de jazidas, que por se tratar de feições muito específicas, ficam concentradas nas 2 ou 3 últimas PCs (Meneses & Almeida, 2012).

A Transformação por Principais Componentes pode ser interpretada gráfica ou algebricamente.

A partir da estatística, os pixels são plotados no espaço x e y , se seus valores forem bastante correlacionáveis, resultarão em uma linha reta (com 45° de inclinação), enquanto que, se x e y não são perfeitamente correlacionáveis, os pixels são delimitados por uma elipse (Meneses & Almeida, 2012).

A partir do centro geométrico da elipse, determina-se a direção que possui a máxima variância ou espalhamento, atribuindo a ela o eixo da PC1 (corresponde ao eixo principal da elipse), o mesmo é feito para a PC2, só que com a segunda maior variância ou espalhamento e respeitando a condição dela ser ortogonal em relação à primeira direção (Crósta, 1992). Esse processo é repetido quantas vezes forem o número de bandas da imagem, até que todos os eixos tenham sido determinados. Por último, rotaciona-se a distribuição do espaço de atributos em volta do centro geométrico, até que cada uma das direções encontradas fique paralela a um dos eixos originais (Crósta, 1992).

A tendência alongada da distribuição é causada pela correlação entre as duas imagens e o espalhamento em volta da diagonal é originado pelas diferenças espectrais entre as duas imagens (os pontos da distribuição ficam mais distantes da diagonal quanto maior a diferença).

De forma algébrica é descrita usando-se os coeficientes de correlação ou as covariâncias para se determinar um conjunto de quantidades chamados de auto-valores (*eigenvalues*, em inglês, que representam o comprimento dos eixos das PCs de uma imagem). Associados com cada auto-valor, existe um outro conjunto de quantidades, que é na verdade um conjunto de coordenadas, chamados de auto-vetores (*eigenvectors*), que representam as direções dos eixos das PCs e servem como fatores de ponderação que definem a contribuição de cada banda original para uma PC (Crósta, 1992).

A técnica Crosta tem como princípio a APC, só que ao invés de usar todas as bandas disponíveis, são escolhidas as bandas do VNIR e SWIR que contenham as principais características espectrais dos minerais índices de alteração hidrotermal.

Neste trabalho, a técnica foi utilizada em duas cenas ASTER, quantificando a radiância de cada pixel.

2.2 Pré-processamento

Nesta etapa foram utilizados os *softwares* ArcGis 10.3 e Envi 5.3

2.2.1 Escolha das Imagens

Devido ao fato do sensor ter sofrido elevação de temperatura em maio de 2008, é necessário escolher uma imagem de data anterior, pois as principais bandas utilizadas em exploração mineral (bandas 4 até 9 do SWIR) foram saturadas.

As imagens encontram-se no sistema de coordenadas geodésicas, em WGS-84 (*World Geodesic System* 1984) e datam do dia 28 de Outubro de 2003.

Para melhor visualização das rochas e do solo, as imagens foram escolhidas em épocas de estiagem, pois a quantidade de vegetação influencia na qualidade da imagem (Figura 3). Embora tenham ocorrido dois picos chuvosos alguns dias antes da aquisição das imagens, esses não foram suficientes para atrapalhar a análise, pois, o ano foi majoritariamente seco.



Figura 3: Dados de pluviosidade modificados do site do Instituto Nacional de Meteorologia-INMET, para a cidade de Santa Maria, cerca de 100km do centro da área. Em vermelho, destaca-se as datas com maior índice de pluviosidade (25 e 26 de outubro) e a data em que as imagens foram adquiridas pelo satélite (28 de outubro).
(http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf)

Os dados disponíveis pelo INMET são da estação meteorológica de Santa Maria, cidade situada a cerca de 100km da área de estudo. Vale ressaltar que três dias antes choveu 161mm e dois dias choveu 71mm, contudo, antes dessa data o ano foi praticamente seco.

Ao contrário de Viana (2012), que usou uma imagem *nível* 1B disponível/doada na época, este trabalho conta com imagens no *nível* 1T baixadas diretamente do Earth Explorer.

Os dados do ASTER Nível 1 *Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance* (AST_L1T) correspondem aos dados ASTER Nível 1B (AST_L1B), que foram corrigidos geometricamente e rotacionados para uma projeção UTM, com norte para cima. As correções de precisão de terreno vinculam pontos de controle no solo com um modelo digital de elevação (ou terreno) para obter maior precisão topográfica (LP DAAC, 2014). Difere do *nível* 1B principalmente por suas dimensões, para o nível 1B, cada um dos três subsistemas de sensores (VNIR, SWIR e TIR) permanecem com dimensões constantes de uma cena para a próxima, mas as dimensões da imagem ASTER *nível* 1T variam de acordo com o processo de rotação (LP DAAC, 2014).

2.2.2 Pré Processamento

Após a aquisição das imagens, As bandas originais do sensor ASTER foram mescladas para formar uma imagem em falsa cor (RGB 231) (Figura 4), de forma que fosse possível identificar as feições (cidades, clareiras, afloramentos, plantações, lagos, etc..) sem a necessidade de se utilizar os recursos online do ArcGIS, que, por serem adquiridos em outras datas, podem mostrar a expansão das cidades/plantações .

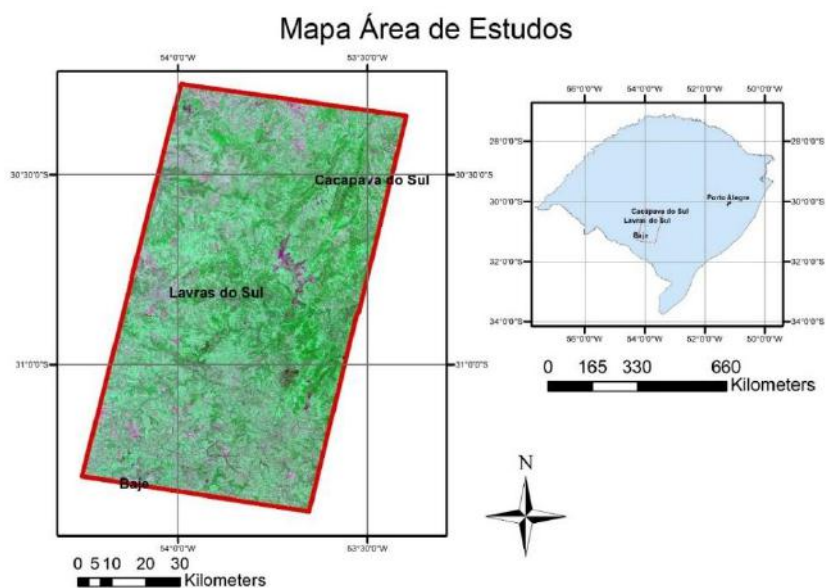


Figura 4: Mapa da área de estudos em Falsa cor (RGB 231) e sua posição em relação ao Estado do Rio Grande do Sul

Antes de começar a trabalhar as imagens, as bandas do SWIR (4 até 9), originalmente com 30 metros de resolução espacial, foram reamostradas, utilizando a interpolação por vizinho mais próximo, para a mesma resolução das bandas do VNIR (1, 2 e 3), 15 metros.

Assim como Viana (2012) os minerais escolhidos como indicadores de fácies hidrotermais foram:

- **Biotita**: alteração potássica;
- **Epidoto**: alteração propilítica;
- **Clorita**: alteração propilítica;
- **Fengita**: alteração fílica;
- **Interestratificado illita-esmectita**: alteração argílica intermediária e;
- **Caolinita**: alteração argílica avançada.

Com exceção da caolinita e alteração argílica avançada, todos as demais fácies e seus minerais índices foram identificadas na área de estudo por Bongiolo *et al.* (2008).

Binotto (2015) reconheceu a paragênese mineral caulinita + illita (fengita + muscovita) + clorita (férica e ferromagnésiana) + hematita + goetita associada a atividade hidrotermal (epitermal baixa sulfetação) para a Mina Uruguai, nas Minas do Camaquã, na porção leste da área. Devido sua semelhança mineralógica em relação a Bongiolo *et al.* (2008), e para facilitar as análises, a assembleia primeiramente descrita foi utilizada como modelo para a toda a área.

As litologias em que as anomalias aparecem foram determinadas a partir de quatro mapas geológicos, correspondentes as folhas Cachoeira do Sul e Pedro Osório, na escala 1:250.000 e as folhas Bagé e Lagoa da Meia Lua, na escala 1:100.000, todas realizadas pela CPRM.

2.3 Processamento

Embora tenham sido corrigidas para o terreno, as bandas do ASTER não recobrem 100% a mesma área imageada. Assim, para evitar que as bordas dessas bandas atrapalhassem a estatística durante o processamento, foi necessário criar uma máscara de corte, eliminando essas zonas e as partes com sobreposição entre as duas imagens.

Com base nos minerais indicadores de fácies hidrotermais e através de bibliotecas espectrais, disponíveis no software ENVI® 5.3, as curvas espectrais de cada mineral foram convolvidas para a mesma resolução espectral do ASTER, de modo que as bandas geradas possam ser interpretadas como as do sensor.

Após a convolução, as novas curvas espectrais foram analisadas para definir as 4 bandas ASTER características de cada mineral (Tabela 1). Elas representam os pontos de maior contraste na curva espectral (Figura 5). Esse número de bandas foi escolhido para que se pudesse utilizar a técnica PCA.

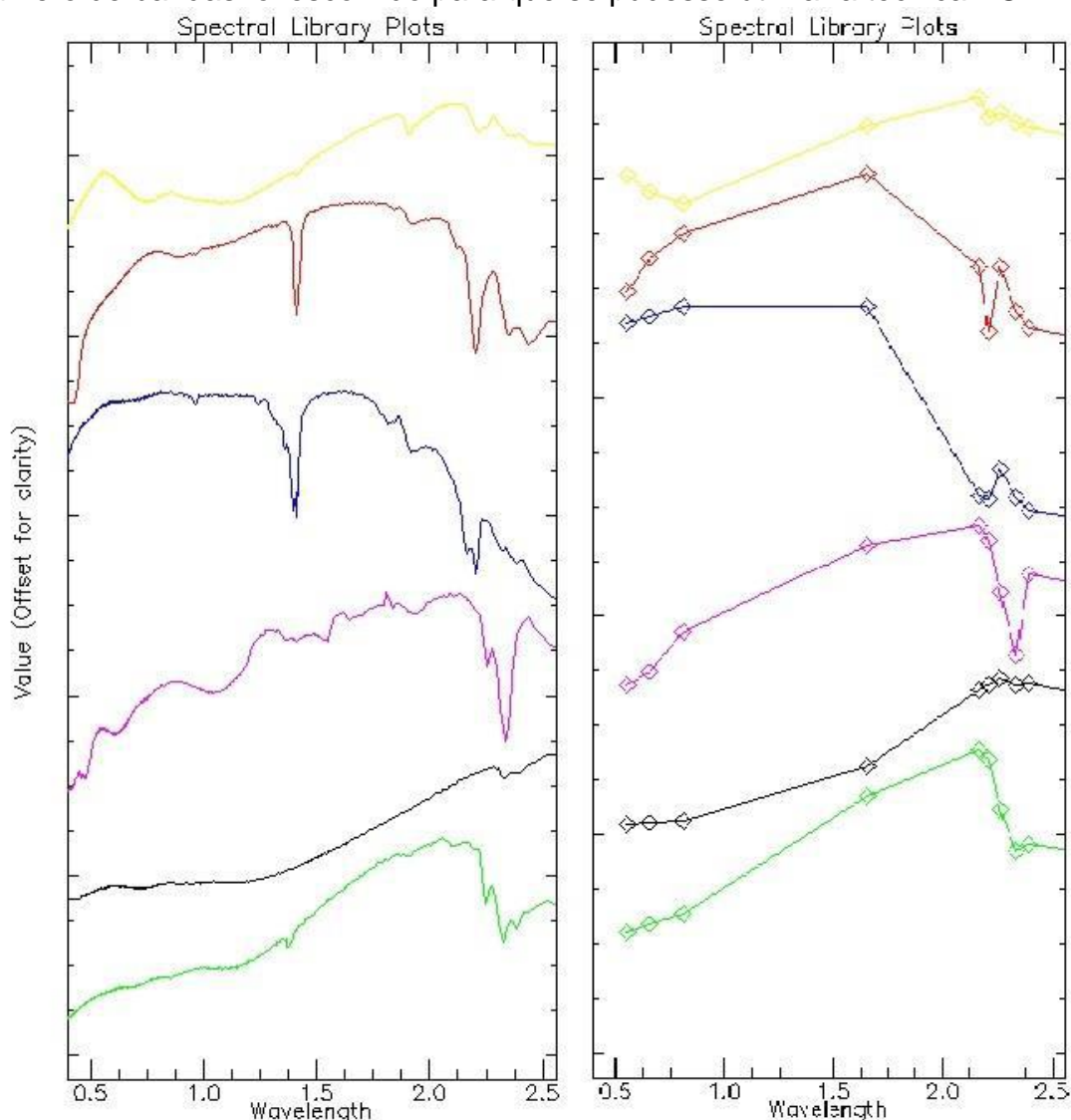


Figura 5: A) Bandas espectrais dos minerais e B) bandas espectrais convolvidas para as bandas ASTER. As cores são as mesmas da tabela 2: Illita-Amarelo; Muscovita-Vermelho; Caolinita-Azul; Epidoto-Rosa; Biotita-Preto e Clorita-Verde.

Assim como Viana (2012), a muscovita foi utilizada para substituir a fengita, que não consta na biblioteca espectral utilizada. Já no caso do interestratificado illita-esmectita, optou-se por utilizar neste trabalho a illita, devido a semelhança entre as curvas e o fato da curva do interestratificado não apresentar grandes contrastes e as bandas ASTER que destacam a presença da illita serem conhecidas.

Mineral	Bandas ASTER
Clorita	3-5-8-9
Epidoto	2-5-8-9
Illita	1-3-5-6
Muscovita	4-6-7-8
Biotita	4-7-8-9
Caolinita	1-4-6-7

Tabela 1: Minerais e suas respectivas bandas ASTER características.

Só então a análise por principais componentes (PCA) foi aplicada, resultando em quatro novas bandas PC's. Como visto anteriormente, ao eliminarem as informações comuns, as últimas PC's concentram justamente as informações de interesse para prospecção mineral (Meneses & Almeida, 2012), mesmo que representem uma parte pouco significativa das informações. Neste caso as últimas PC's correspondem a PC3 e PC4, assim sendo, as PC1 e PC2 foram descartadas na aplicação da técnica.

Nesta fase, o *software* utilizado foi o ArcGIS versão 10.3. A partir da estatística de cada PC, nele foram definidos intervalos de intensidade, para descobrir o que era anômalo e o que era background. Esses intervalos foram definidos por intervalos de $\frac{1}{2}$ desvio padrão ao redor da média, resultando em 12 ou 13 classes para cada mineral, das quais as extremidades foram selecionadas para representar a abundância do mineral estudado no pixel.

Como não há uma “receita” para interpretação das PC's esta pode se tornar ambígua. Uma maneira de se compreender como as Pcs funcionam é examinar a matriz de auto-vetores. As PC(s) que concentrarão as informações espectrais desejadas, serão aquelas que apresentarem na matriz de auto-vetores os maiores contrastes valores e/ou entre sinais (positivo e negativo) (Meneses & Almeida, 2012).

Contudo, o ArcMap 10.3 não permite a visualização desta matriz, ficando a interpretação subjetiva ao interprete. Neste trabalho, a PC3 foi a que visualmente melhor se adequou, mostrando anomalias com o menor ruído se comparado a PC4, que por conta deste ruído, apresenta uma textura salpicada, conhecida em inglês como *salt and pepper*.

A bibliografia revela que sistemas pórfiro e epitermal foram atuantes na região central da área. A partir disso, com a ideia de encontrar alvos em áreas em que não se tem conhecimento sobre alterações hidrotermais, a técnica foi extrapolada.

2.3.1 A Escolha das Anomalias

As áreas anômalas foram definidas pela concentração de três ou mais minerais, em um espaço maior do que 6 pixels (90m). Cada mineral recebeu uma cor, para facilitar seu reconhecimento (Tabela 2), sendo usadas para estabelecer os pixels anômalos para cada mineral.

Mineral	Cor
Clorita	Verde
Epidoto	Rosa
Illita	Amarelo
Muscovita	Vermelho
Biotita	Preto
Caolinita	Azul

Tabela 2: Representação dos minerais em cores.

Três critérios de seleção foram aplicados para estabelecer as áreas mais anômalas, sendo o principal a presença dos minerais índice, seguido pela litologia em que se encontravam e por fim a presença de estruturas geológicas (falhas/fraturas) que pudessem estar associadas a presença dos minerais. A junção dos três critérios definiu as melhores anomalias.

As litologias esperadas eram as rochas vulcânicas e plutônicas associadas aos granitoides, seguida por rochas sedimentares (arenitos/ conglomerados produtos do retrabalhamento de rochas mineralizadas com Au-Cu) e metamórficas de composição diorítica, estas representando as litologias menos esperadas.

Posteriormente, os resultados obtidos foram comparados com as análises descritas por Bongioiolo (2006) e Viana (2012). As áreas anômalas também receberam cores de acordo com a presença dos minerais, como mostra a tabela:

COR	ANOMALIA
Vermelho	6 minerais
Laranja	5 minerais
Amarelo	4 minerais
Verde	3 minerais
Preto	Falsas anomalias

Tabela 3: Tabela de anomalias

CAP 3 --- REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Sistemas Hidrotermais

São associados a circulação de soluções aquosas quentes pelas rochas, podendo alterar sua mineralogia e textura, além de depositar minerais de interesse econômico. Essa deposição se dá devido a mudanças físico-químicas da solução que permitem a precipitação de forma disseminada (espalhada pela rocha) ou concentrada (em zonas fraturadas).

A água que circula na crosta em altas profundidades, é aquecida pelo gradiente geotérmico e reage com os minerais presentes, alterando as rochas e em alguns casos as mineralizando.

Para serem eficazes como agentes de mineralização, os fluidos hidrotermais precisam circular e interagir com grandes volumes de rocha, para que dissolvam e transportem os metais necessários para formar depósitos hidrotermais. Para que os constituintes dissolvidos possam ser concentrados, o fluxo de um fluido de minério deve ser focado, de preferência em uma porção acessível da crosta terrestre que tenha dimensões consistentes para formar um depósito economicamente viável.

3.1.1 A Origem dos Fluidos

A água que participa das reações pode ter diversas origens e características, mas nada impede que se misturem, gerando composições híbridas. A seguir as possíveis origens:

-Marinha: Principalmente próximo a dorsais oceânicas, o fluido levemente salino ao percolar pelas falhas é aquecido e sai em fumarolas (*blacksmokers*) trazendo consigo vários metais.

-Meteóricas: É a água que esteve em contato com a atmosfera (água da chuva e superficiais como rios, lagos, etc.), sendo responsáveis pela formação de depósitos caracterizados por relativamente baixas temperaturas, pouco transporte e precipitação (Robb, 2005).

-Conatas: É a água contida nos poros dos sedimentos e presa nas estruturas dos minerais (sem fazer parte de sua composição química), expulsa durante a compactação e diagênese. O fluido é salino, com teores dependentes das rochas ao redor, e sua temperatura varia com a profundidade.

-Metamórfica: Água e voláteis (vapor e CO₂ principalmente) liberados pela desidratação de minerais durante o metamorfismo progressivo. Apresentam baixa salinidade; e

-Magmática: separação de fluido aquoso e voláteis do magma como será explicado a seguir.

Conforme ocorre a cristalização de um magma granítico, a concentração de incompatíveis dissolvidos, incluindo H₂O e outros voláteis tende a aumentar, pois inicialmente a cristalização é dominada por minerais anidros. Em algum momento ocorre a saturação no magma, gerando a exsolução de um fluido aquoso quimicamente distinto do *melt* silicatado. Esse processo é chamado de *boiling*. Mesmo que alguns íons OH⁻ originais no magma possam ser utilizados para formar minerais hidratados (como biotita e hornblenda), a quantidade de água magmática-hidrotermal formada pode ser muito substancial (Robb, 2005).

Segundo Robb (2005) a profundidades rasas (2 km), a saturação de H₂O é alcançada após apenas cerca de 10% de cristalização. Já as pressões baixas promovem a separação de bolhas de gás (vapor de água e outros voláteis, ex.: CO₂) do líquido, parecendo que o fluido efervesce daí o nome *boiling* (do inglês, *to boil*= ferver).

O processo em que isso acontece pela diminuição da pressão é chamado de primeiro *boiling*, ocorre na natureza quando a câmara magmática ascende ou é falhada. O segundo *boiling* acontece, como descrito acima, pela cristalização progressiva de minerais anidros em condições isobáricas e ocorre em sistemas magmáticos mais profundos, com um estágio de cristalização relativamente avançado (Robb, 2005). Esse processo é importante e muitas vezes influencia a colocação das mineralizações.

Como evidenciado por Bongiolo (2006), a energia térmica é dissipada de duas formas: por Condução ou difusão (em ambientes pouco permeáveis, as alterações são governadas pela rocha e não pelo fluido, baixa razão F/R, devido à condução do calor ser mais rápida que as trocas químicas dos íons em solução); e por Convecção (depende da permeabilidade e hidrodinâmica do meio, alta razão F/R).

A percolação do fluido hidrotermal depende da porosidade e permeabilidade das rochas, assim como da presença de falhas, fraturas e zonas com menor pressão, como charneiras de dobras. Após o *boiling*, o fluido aquoso/gasoso tende a subir e se concentrar no topo da câmara magmática, devido sua menor densidade em relação ao magma granítico. Essa ascensão aumentará a pressão no topo da intrusão, criando fraturas que podem atingir a rocha encaixante e até a superfície.

Uma vez que ocorra o fraturamento, seja por *boiling* ou gerado pelo posicionamento da intrusão, a permeabilidade aumentará, a mistura de fluidos será propiciada e o calor será disperso por convecção. Com o preenchimento das fraturas, novamente o meio fica impermeável, retornando ao modo de dissipação por condução, enquanto não houver uma nova geração de fraturas e novo episódio de alteração.

A passagem desses fluidos induz mudanças metassomáticas, conhecidas como alteração hidrotermal. Existem vários tipos, cada uma com sua assembleia mineralógica característica.

Os sistemas hidrotermais gerados por intrusões são os predominantes na convecção de fluidos na crosta terrestre (Bongiolo, 2006), mas para que efetivamente funcionem por um longo período, múltiplas intrusões são necessárias, mantendo o fluxo de calor e possibilitando a deposição de metais, tais como Au e Ag. As fontes dos metais depositados nos sistemas hidrotemais são variadas. A Tabela 4 sumariza os principais tipos de depósitos associados a alteração hidrotermal.

Tipo de Depósito	Relação com o magma	Temp. (°C)	Profundidade (km)	Fluido	Metais Associados	Análogos Ativos
Pórfiro	Adjacente ou contido na intrusão	300°C a >600°C	2 a 5km	Hipersalinos e vapores imiscíveis	Cu±Mo±Au, Mo, W ou Sn	Corpos magmáticos rasos sob vulcões
Skarn	Adjacente a intrusão principalmente em rochas carbonáticas	400 a 600°C	1 a 5Km	Salino a moderadamente salino	Fe, Cu, Sn, W, Mo, Au, Ag, Pb-Zn	Corpos magmáticos rasos sob estratovulcão
Veios Associados a Intrusões	Fraturas próximas ou na intrusão	300 a 450°C	Variável	Salinidade baixa a moderada	Sn, W, Mo± Pb-Zn, Cu, Au	Corpos magmáticos rasos sob vulcões
Epitermal Alta Sulfetação	Acima da intrusão	<300°C	Próximos à superfície a >1,5km	Salinidade baixa a moderada, condensado ácido precoce	Au-Cu, Ag-Pb	Fumarolas de alta temperatura e fontes ácidas próximas a condutos vulcânicos
Epitermal Baixa Sulfetação	Distante(?) da fonte de calor magmática	150 a 300°C	Próximos à superfície a 1-2km	Salinidade muito baixa, rico em gás e pH neutro	Au (Ag, Pb-Zn)	Sistemas geotermiais com fontes quentes de pH neutro, poços de lama
				Salinidade moderada	Ag-Pb-Zn(Au)	Não observado, salmouras efêmeras?
Sulfeto maciço	Próximo a domos extrusivos	<300°C	sobre ou próximo ao assoalho oceânico	Salinidade próxima a da água do mar, rico em gás	Zn-Pb-Ag (Cu ou Au)	Condutos de retroarco em fundo oceânico, fumarolas negras

Tabela 4: Tipos de depósitos minerais associados ao magmatismo em arcos vulcânicos, modificado de Bongiolo (2006)

3.1.2 Sistema Pórfiro

Depósitos tipo Pórfiro são associados a intrusões rasas de corpos porfíricos (de onde vem seu nome), que são geralmente granitoides. A maioria dos depósitos data do Cenozóico e Mesozóico, por serem corpos rasos estão mais susceptíveis a erosão, o que prejudicada a identificação de depósitos mais antigos. Esses depósitos são as principais fontes de Cu e Mo, principalmente ao redor do círculo de fogo do pacífico (Figura 6), onde ocorrem subducções do tipo Andina (crosta oceânica) (Robb, 2005).

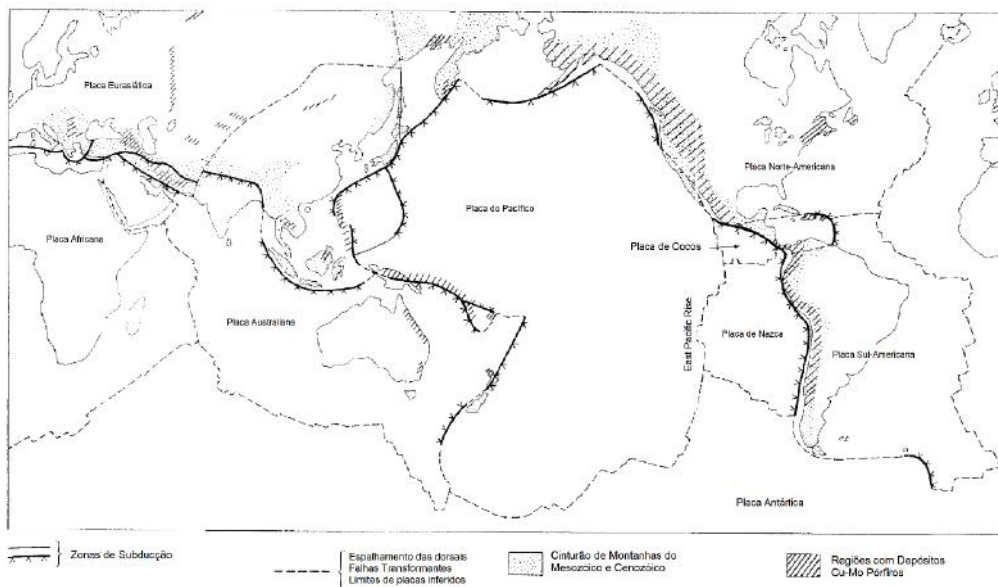


Figura 6: Mapa mostrando as principais regiões com depósitos de Cobre e Molibdênio Pórfiro, modificado de Evans(1993)

Segundo Bongiolo (2006) também podem ocorrer em ambientes de arco ou retroarco, durante ou logo após a subducção e sob regimes tectônicos de compressional a extensional, sendo alguns depósitos condicionados por estruturas regionais.

Sua maior característica é sua grande dimensão, o que implica que os fluidos hidrotermais percolaram por um grande volume de rocha, ou seja, os depósitos costumam apresentar grande tonelagem. Múltiplas intrusões são comuns, normalmente mais jovens hospedam a mineralização com os maiores teores.

Foram reconhecidas seis zonas de alteração com assembleias mineralógicas características: Ca-Na silicática, potássica (K silicática), propilítica, fílica (ou sericítica), argílica intermediária e argílica avançada. Estas são zonadas lateral e verticalmente em faixas aproximadamente concêntricas a partir da intrusão (Figura 7), podem alterar todos os minerais (pervasiva), somente alguns minerais específicos (pervasiva seletiva) ou apenas certas porções da rocha (não pervasiva); e não se desenvolvem no mesmo intervalo de tempo, sendo característico um padrão de evolução das assembleias minerais e do estado de sulfetação e acidez dos fluidos envolvidos (Bongiolo, 2006).

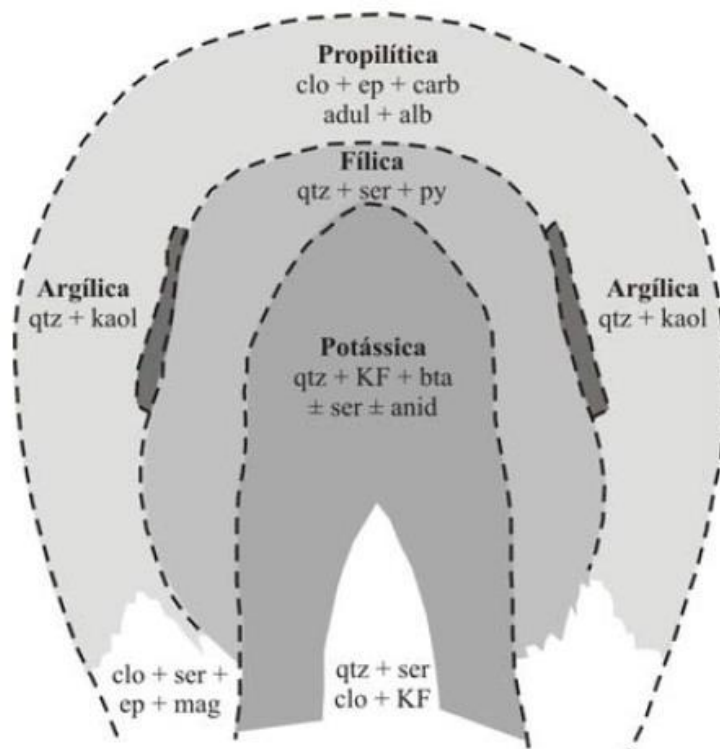


Figura 7: Alterações hidrotermais ao redor de uma intrusão porfírica. Lowel & Gilbert (1970) modificado por Bongiolo (2006)

A alteração Ca-na silicática

É precoce, associada às porções profundas dos depósitos juntamente com a alteração potássica, o que dificulta a separação. Sua assembleia mineral é composta por anfibólio (actinolita a hornblenda), albita ou oligoclásio e magnetita;

Potássica

Acontece em porções profundas dos sistemas, afetando tanto a rocha intrusiva quanto as encaixantes. Os fluidos são de origem magmática, compostos por vapor e líquido hipersalino (40-60 W% eq NaCl) em temperaturas entre >500° a 700°C.

Os minerais essenciais são tipo de alteração K Feldspato e biotita, mas também podem ocorrer magnetita, anidrita, sulfetos (calcopirita, pirita, molibdenita e +- bornita) além de stockworks de quartzo.

Propilítica

Ocorre precocemente e está associada a dissipação do calor pela intrusão. Atua nas encaixantes formando halos mineralizados externos às intrusões, alterando um grande volume de rochas. Apresenta baixa razão F/R e os fluidos são de origem conata.

Os minerais máficos originais da rocha são parcial ou totalmente alterados para clorita (\pm actinolita), que junto com epidoto, albita, magnetita, sulfetos (pirita, \pm calcopirita, tetraedrita, esfalerita e galena), quartzo e carbonatos (calcita, dolomita ou ankerita) formam a mineralogia essencial. Também podem ocorrer sericita, montmorilonita e hematita como acessórios.

Argílica intermediária

Possui intensidade e mineralogia variada sobrepondo a assembleia do tipo potássica em zonas superiores desses depósitos. Preserva *stockworks* de quartzo preexistentes, mas seus conteúdos de Cu e Au são modificados.

A mineralogia é representada por muscovita de granulação fina (sericita), illita, clorita, calcita e esmectita. Magnetita, pirita, hematita especular e \pm calcopirita ocorrem como vênulas e grãos disseminados.

A alteração fílica:

Também chamada de alteração sericítica, se desenvolve nas partes superiores dos depósitos, destruindo parcial ou completamente a textura e mineralogia primária e/ou da assembleia hidrotermal prévia. Os fluidos são de origem magmática, porém ocorrem em temperaturas mais baixas ($<350^{\circ}\text{C}$) e salinidade entre 5 e 20 W% eq. NaCl. As razões F/R elevadas indicam um contexto de abertura do sistema por intenso fraturamento, caracterizados pela formação de uma grande quantidade de argilominerais. Constitui grande parte do minério e sua assembleia mineralógica é representada por quartzo, sericita e pirita.

Argílica avançada

Ocorre na porção superior destes depósitos, tem grande influência de fluidos meteóricos, porém seus fluidos ácidos (pela presença de H_2S e formação de H_2SO_4), principalmente na interação entre os sistemas pórfiro e epitermal, lixiviam e destroem a maioria dos minerais das encaixantes ou formados por alterações hidrotermais anteriores, com exceção de *stockworks* de veios de quartzo estéreis.

Sua mineralogia essencial é representada por quartzo (calcedônia, *vuggy quartz*), alunita (sulfato de alumínio e potássio hidratado), pirofilita (silicato de alumínio hidratado), diásporo (óxido de alumínio hidratado), dickita e caolinita, além de barita e enxofre nativo em estágios finais (veios). Pirita, enargita, luzoniata (sulfeto de Cu e As), covelita, calcocita e bornita podem ocorrer como acessórios.

Esta zona de alteração se mantém ativa após cessarem os outros processos de alteração. Seus últimos estágios compreendem atividade de arqueamento de vapores próximo à superfície.

3.1.3 Sistema Epitermal

Depósitos Epitermais são formados em temperaturas e profundidades relativamente baixas (<300°C, 1-2km) em ambientes de arcos vulcânicos ativos. Sua geometria é controlada pela permeabilidade das rochas hospedeiras, gerando principalmente depósitos em veio.

Assim como os depósitos tipo pórfiro, sua preservação no registro geológico é difícil, por serem rasos (de onde vem o nome, do grego *Epi*= superior, sobre; *Termal*= quente) sofrem com a erosão e estão relacionados às porções mais rasas de sistemas hidrotermais associados a intrusões, sendo fontes de Au, Ag, Cu e outros metais.

Dois estilos de mineralização são reconhecidos, os depósitos de Alta Sulfetação e os de Baixa Sulfetação (Figura 8), sendo que alguns autores sugerem ainda um terceiro tipo, transicional, onde ocorre a mistura dos dois. Estes termos referem-se especificamente ao estado de oxidação do enxofre no fluido de minério, cuja química e pH também se relacionam com a natureza da alteração associada a cada tipo (Robb, 2005).

1) Baixa sulfetação:

São geralmente formados em riftes continentais e arcos de ilhas contendo vulcanismo bimodal, por fluidos profundos com pH próximos a neutralidade, devido a mistura com água meteórica. Ricos em H₂S e HS⁻ e gases como CO₂, os fluidos apresentam salinidade baixa (1-2w% eq NaCl) e ascensão relativamente lenta, resultando em um sistema dominado pela rocha. *Boiling* é um processo importante (Bongiolo, 2006).

Ao atingir a superfície, o líquido deposita *sinters* (terraços) de sílica. Os sulfetos principais são pirita, pirrotita, arsenopirita e esfalerita. Como as temperaturas são relativamente menores, podem ocorrer até 6km de distância do conduto vulcânico.

2) Alta sulfetação:

Ocorre nas proximidades de condutos principais (vulcânicos-hidrotermais), associados a ambientes de arcos de ilha ou continentais, em regime extensional a compressivo, mas em geral se desenvolvem destes dois tipos de depósitos em associação ocorre comumente durante a diminuição do stress regional. O sistema é dominado por fluidos, que são ricos em SO₂, HSO₄⁻ e SO₄²⁻ (estado oxidado do enxofre e, embora sejam de origem magmática, a mistura de fluidos é mais importante que o *boiling*). Suas principais características são as fumarolas de alta temperatura e condensados de água extremamente ácida. Enargita, luzonita, covelita e pirita são os sulfetos que cristalizam (Bongiolo, 2006).

Seu pH ácido e oxidante é capaz de lixiviar a maioria dos elementos maiores das rochas vulcânicas e vulcanossedimentares hospedeiras, deixando textura *vuggy* (porosa) e alteração argílica avançada (Robb, 2005).

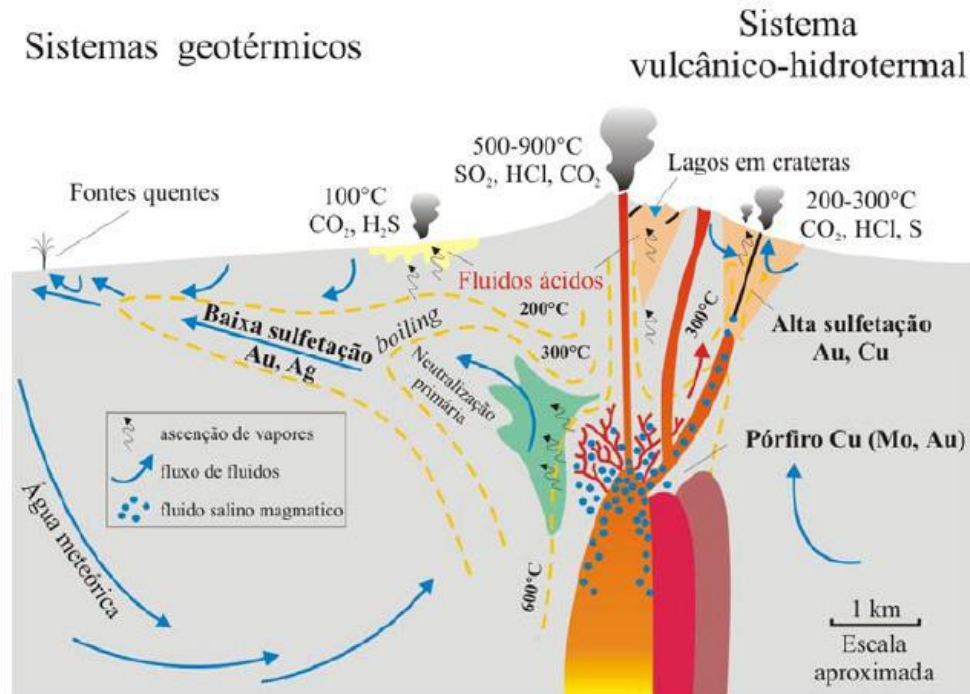


Figura 8: Processos que ocorrem em sistemas vulcânico-hidrotermal e geotérmico. Onde ocorrem depósitos epitermais de alta e baixa sulfetação, associados a uma fonte de calor que pode gerar depósitos do tipo pórfiro. Traduzido de Hedenquist & Lowenstern (1994) por Bongioiolo (2006)

Os depósitos apresentam padrão zonado, com o afastamento da zona mineralizada tem-se a alteração argílica avançada, alteração argílica e alteração propilítica. A tabela 5 sumariza os dois tipos:

	Alta Sulfetação	Baixa sulfetação
Estado do S	Forma oxidada (SO_2 , SO_4^{2-} , HSO_4^-)	Forma reduzida (HS^- , H_2S)
Outros nomes	Ouro-alunita, Alunita-caolinita, ácido- sulfato	Adularia-Sericita, relacionado a fontes termais
Fluidos	pH ácido, inicialmente salino, predominantemente magmático	pH quase neutro, baixa salinidade, rico em gases (CO_2 , H_2S), predominantemente meteórico
Assembleia de alteração	Argílica avançada (zonação: quartzo-alunita- caolinita- illita-montmorillonita- clorita)	Adularia-Sericita (zonação: quartzo/calcedônia- calcita- adularia-sericita- clorita)
Associação de metais	Au- Cu (Ag, Bi, Te subordinados)	Au- Ag (As, Sb, Se, Hg subordinados)

Tabela 5: Resumo dos sistemas Epitermais de Alta e Baixa Sulfetação, modificada de Robb (2005)

Através de diversas técnicas (como difratometria de raios X, inclusões fluidas e isótopos estáveis, além de dados geoquímicos e de mapas geológicos) Bongioiolo (2006) constatou que as mineralizações da região de Lavras do Sul consistem em uma superposição de sistemas pórfiro e epitermal. Os estágios hidrotermais evoluíram de um fluxo condutivo (alterações potássica e propilítica) para um fluxo convectivo (alterações fílica e argílica intermediária). Esses halos de alteração também são mineralizados, sendo as principais fases secundárias associadas principalmente à sericita + sulfetos nos granitoides e a sericita+ clorita + sulfetos nas rochas vulcânicas (Bongioiolo, 2006). Vale ressaltar que sericita é um termo genérico para diversos filossilicatos dioctaédricos (muscovita, fengita, illita, etc...). A prolongada atividade hidrotermal na região expôs as rochas a superposição de diferentes episódios mineralizadores (Gastal, et al., 2015).

Bongioiolo *et al.* (2011) perceberam que é possível observar uma evolução espacial e temporal da alteração hidrotermal (Figura 9). A distribuição da alteração fílica de oeste (mais abundante) para leste (menos abundante), representada por predominância de fengita e illita, é interpretada por esses autores como a porção mais profunda do corpo granítico que intrudiu na sequência vulcanogênica, a cristalização desses minerais ocorreu com predomínio de fluidos magmáticos; enquanto que a distribuição da alteração argílica intermediária na borda leste do corpo granítico e na sequência vulcanogênica, representada pela predominância de interestratificado illita-esmectita, sua cristalização ocorreu com predomínio de fluidos meteóricos, canalizados através de fraturas.

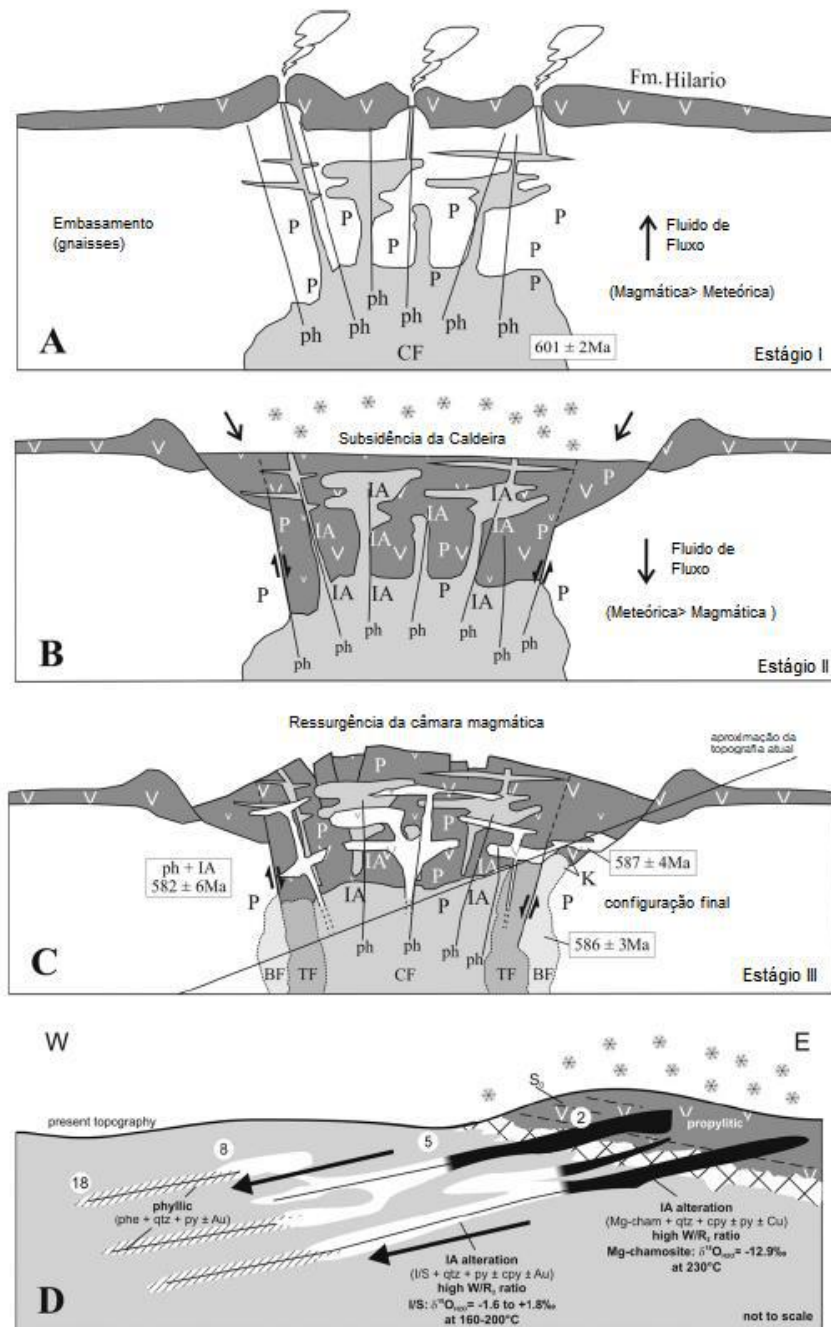


Figura 9: Modelo esquemático da evolução dos eventos magmáticos-hidrotermais no Distrito Aurífero de Lavras do Sul. (A) O Estágio I compreende contemporaneidade do vulcanismo shoshonítico (Formação Hilário) e fácies central (CF) do Complexo Granítico Lavras, com desenvolvimento da alteração propilítica (além de localizadamente alterações potássica e fílica inicial) em resposta a predominância do fluxo de fluido magmático ascendente. (B) Estágio II: Alteração fílica associado aos fluidos magmáticos dominantes, desenvolvida cada vez que a pressão litoestática é superada pela pressão de fluido, alternando entre o fluxo de fluido condutivo e convectivo. Com o colapso da caldeira, fluidos meteóricos infiltram e cristalizam a alteração argílica intermediária sobre a alteração fílica anterior. (C) O Estágio III representa a ressurgência da câmara magmática principal e posterior intrusão dos monzonitos porfíricos. (D) Seção transversal com a disposição atual basculada dos ambientes interpretados como transição dos tipos pórfiro-epitermal em Lavras do Sul. Alterações: P- Propilítica; ph- Fílica; IA- Argílica Intermediária e K- Potássica. Traduzido de Bongioiolo *et al.* (2011).

3.2 Sensoriamento Remoto

3.2.1 Introdução

Sensoriamento remoto pode ser definido como uma série de técnicas de obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem que haja um contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto, ou seja, o objeto é registrado pelo sensor por meio de medições da radiação eletromagnética.

Agrega tecnologia de sensores imageadores e não imageadores, sendo uma ferramenta de grande valia no auxílio da pesquisa mineral contribuindo para a identificação, mapeamento e avaliação de diferentes tipos de depósitos minerais. Os sensores orbitais e aerotransportados atuais permitem obter assinaturas espectrais que podem contribuir na identificação da presença de minerais formados por processos de alteração hidrotermal com deposição de metais como ouro, prata, cobre entre outros (Santos, et al. 2010).

3.2.2 Conceitos de Sensoriamento Remoto

A radiação eletromagnética pode ser entendida como uma mistura indissociável de onda e energia, de forma que as imagens dos objetos sempre são as respostas em função do tamanho da onda e da intensidade de sua energia. Pode ser simplificado em dois modelos: Ondulatório e Corpuscular.

O Ondulatório explica as características das imagens em função da relação entre o tamanho da onda e o tamanho de um objeto qualquer. Por exemplo, se o comprimento de onda for menor do que o tamanho das moléculas do objeto, essas ondas serão barradas/refletidas, e não conseguirão atravessar o objeto. Isso se torna um problema quando o objeto é uma nuvem, pois o sensor não consegue detectar o que estiver abaixo dela. Caso comprimento de onda seja maior que o das partículas, isso se inverte, e o sensor consegue detectar como se não existisse obstáculo. Esse é o motivo do uso de radares (comprimento das micro-ondas) em áreas com vegetação densa como a Amazônia.

Já o modelo Corpuscular diz que para cada comprimento de onda há uma quantidade de energia específica, que interage com o objeto ao atingir sua superfície; parte da energia será então absorvida, enquanto que parte será refletida. Materiais de diferentes composições químicas apresentam absorções e reflectâncias diferentes, gerando imagens em diferentes tons de cinza.

Pode-se dizer então que o modelo ondulatório se relaciona com as propriedades texturais dos objetos, enquanto que o modelo corpuscular às propriedades composicionais. Sendo assim, para se discriminar ou diferenciar nas imagens de sensoriamento remoto um objeto do outro, como uma ardósia de um granito, deve-se ter imagens nos comprimentos de onda de alta energia, que possam interagir com os minerais constituintes. Para que possamos ver as diferenças entre duas rochas, em função tão somente de suas texturas (formas de relevo), é também aconselhável a obtenção de imagens nos grandes comprimentos de onda, nas quais a textura da superfície das rochas comanda as intensidades de reflectância (Meneses, 2012).

Obrigatoriamente a radiação eletromagnética passa pela atmosfera, interagindo com os gases que a compõe e com partículas suspensas. Essa interação promove a absorção e espalhamento, redirecionando a energia e diminuindo a eficiência do sensor na identificação dos objetos terrestres, pois, ele receberá a energia refletida não somente do alvo como também a radiação que a atmosfera espalhou.

O que os sensores medem é a radiância, a quantidade de energia que volta ao sensor. Contudo, essa radiância pode apresentar diferenças de um momento para outro, mesmo que os alvos não tenham mudado, isso ocorre porque a energia incidente (irradiância) varia de acordo com a época de levantamento de dados. A incidência solar varia com as estações do ano, assim como noite e dia. Outro fator, mais dinâmico, são as mudanças atmosféricas, que promovem uma maior interação com os gases e partículas, perdendo energia por absorção e dispersão. Um problema que aparece em sua interpretação é devido à limitação da resolução espacial dos sensores, a radiância medida é uma média das radiâncias de vários materiais que estão dentro do campo de visada do sensor.

O espectro eletromagnético (Figura 10) é o intervalo completo das regiões espectrais da Radiação Eletromagnéticas conhecidas pelo homem, que variam desde os Raios cósmicos (comprimento de 10^{-15}m) até ondas de frequência extremamente baixa (comprimento de 10^8m). A maior fonte natural de radiação eletromagnética é o Sol, a Terra, com menor potência, também é uma fonte, porém ambas apresentam limitações, por isso existem fontes artificiais capazes de suprir todo o espectro.

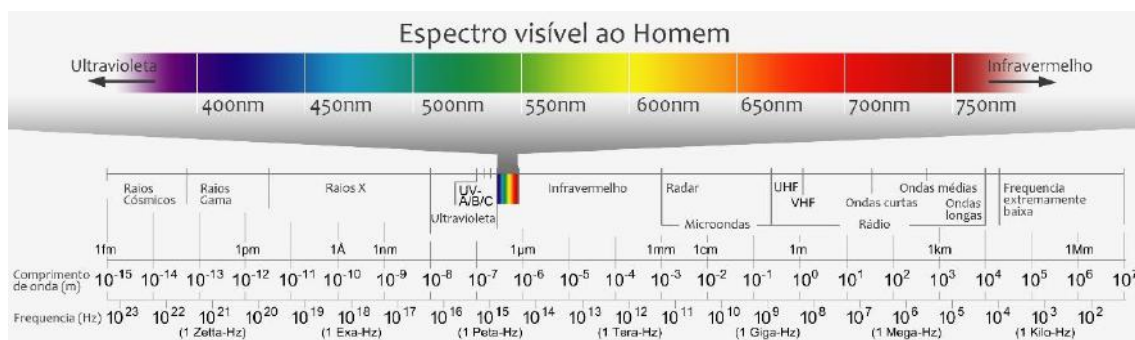


Figura 10: O Espectro Eletromagnético: suas subdivisões de acordo com frequência e comprimento de onda. Disponível em: http://www.apoioescolar24horas.com.br/salaaula/estudos/fisica/035_ondas/#pag4-tab

Embora o espectro eletromagnético seja contínuo, foi arbitrariamente dividido pelo homem em intervalos de comprimentos cuja nomenclatura é dada em função do uso que o homem encontrou para as suas aplicações (Tabela 6).

Divisão do Espectro Eletromagnético		Subdivisões do Visível	
Intervalo Espectral	Comprimento de onda	Comprimento de onda	Cor refletida
Raios cósmicos	0,01 Å	0,380 – 0,455	Violeta
Raios gama	0,01 – 0,1 Å	0,455 – 0,482	Azul
Raios X	0,1 – 10 Å	0,482 – 0,487	Azul – esverdeado
Ultravioleta	100nm – 0,38µm	0,487 – 0,493	Azul – verde
Visível	0,38 – 0,76 µm	0,493 – 0,498	Verde – azulado
Infravermelho próximo	0,76 – 1,2 µm	0,498 – 0,530	Verde
Infravermelho de ondas curtas	1,2 – 3,0 µm	0,530 – 0,559	Verde-amarelado
Infravermelho médio	3,0 – 5,0 µm	0,559 – 0,571	Amarelo-verde
Infravermelho termal	5,0 µm – 1 mm	0,571 – 0,576	Amarelo-esverdeado
Micro-ondas	1 mm – 100 cm	0,576 – 0,580	Amarelo
Rádio	1 m – 10 km	0,580 – 0,587	Laranja-amarelado
Áudio	10 – 100 km	0,587 – 0,597	Laranja
Corrente alternada	> 100 km	0,597 – 0,617	Laranja-avermelhado
		0,617 – 0,760	Vermelho

Tabela 6: Divisão do Espectro Eletromagnético de acordo com a nomenclatura usada para cada comprimento de onda, e detalhe para a divisão das cores no visível. Observações: $1\text{Å}=10^{-10}\text{m}$, $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$, $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$. Tabela modificada de Meneses & Almeida (2012)

Existem quatro tipos de resoluções de imagens de satélite:

-Resolução espacial: Refere-se ao tamanho do menor objeto que pode ser identificado em uma imagem. Comumente é associado ao tamanho do pixel.

-Resolução radiométrica: Refere-se a capacidade do detector em medir a diferença de intensidade de radiância de cada pixel, ou seja, a capacidade de medir as menores diferenças dos níveis de energia. É medida em bits (dígitos binários), quanto maior o número de bits melhor será a qualidade da imagem. Uma imagem de 2 bits possui apenas 4 níveis de cinza (2^2) enquanto que uma de 8 bits apresenta 256 níveis (2^8), isto quer dizer que consegue discriminar até 256 valores de radiância por banda espectral (esta é a resolução radiométrica mais comum aos sensores remotos multiespectrais com resolução espacial de 10 a 30 metros).

-Resolução espectral: é definida pelo número de bandas que o sensor possui; a largura em comprimento de onda das bandas e as posições em que estão situadas no espectro eletromagnético. Um sensor terá melhor resolução espectral se possuir maior número de bandas situadas em diferentes regiões espectrais e com larguras estreitas de comprimentos de onda.

-Resolução temporal: de quanto em quanto tempo uma área volta a ser imageada.

3.2.2 Sensor ASTER

Laçada em 18 de Dezembro de 1999, o satélite Terra (EOS-AM1) faz parte da missão EOS (*Earth Observing System*), que tem como objetivo investigar a relação entre os sistemas terrestres e mudanças climáticas, para melhor compreender os ciclos climáticos e as alterações provocadas pelo ser humano (NASA, 2014). Para esse fim, essa missão internacional conta com cinco sensores remotos, dentre eles o *ASTER* (Figura 11).

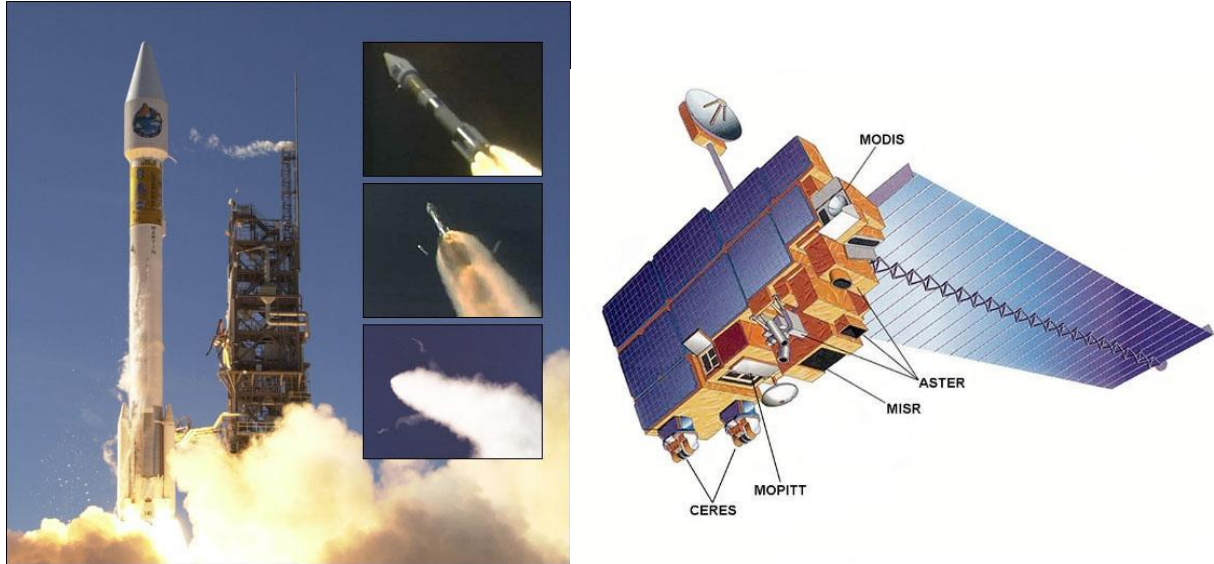


Figura 11: A) Lançamento do Satélite Terra (EOS-AM1) em 18 de dezembro de 1999. Imagem disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=499>. B) Detalhe do Satélite Terra e localização dos sensores. Imagem disponível em: https://www.nasa.gov/mission_pages/terra/spacecraft/index.html.

O sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* na sigla em inglês) é uma parceria entre a agência espacial Norte Americana (NASA) e o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (*Ministry of Economy Trade and Industry – METI*), foi inicialmente projetado para durar 5 anos, mas já excedeu 13 anos desse tempo, e ainda continuará em operação (NASA, 2016).

Esse sensor é responsável por coletar dados de média resolução espacial em 14 bandas distribuídas entre as faixas do visível e do infravermelho termal do espectro eletromagnético (Figura 12). Ao todo são três subsistemas de imageamento independentes (Tabela 7): visível e infravermelho próximo (VNIR- *Visible and Near-Infrared*) com três bandas e pixel de 15 metros; infravermelho de ondas curtas (SWIR- *Short Wave Infrared*) com seis bandas e pixel de 30 metros; e infravermelho termal (TIR- *Thermal Infrared*) com cinco bandas e pixel de 90 metros (Kafino, 2009).

ASTER				
Subsistema	Banda N°	Intervalo Espectral (μm)	Resolução Espacial	Resolução Radiométrica
VNIR	1	0,520-0,600	15m	8 Bits
	2	0,630-0,690		
	3N e 3B (estereopar)	0,760-0,860		
SWIR	4	1,600-1,700	30m	8 Bits
	5	2,145-2,185		
	6	2,185-2,225		
	7	2,235-2,285		
	8	2,295-2,365		
	9	2,360-2,430		
TIR	10	8,125-8,475	90m	12 Bits
	11	8,475-8,825		
	12	8,925-9,275		
	13	10,250-10,950		
	14	10,950-11,650		

Tabela 7: Características do sensor ASTER. Modificado de Kafino (2009)

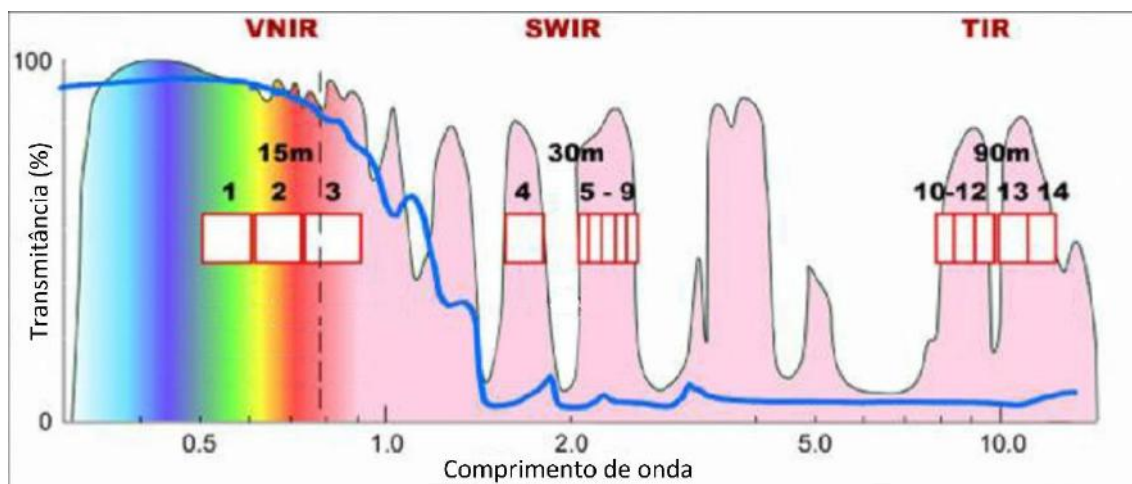


Figura 12: Localização das bandas espectrais do sensor ASTER no espectro de transmissão atmosférica. Modificado de Wahi et al. (2013)

O sensor ASTER também possui um telescópio de retrovisada o que permite a coleta de imagens estereoscópicas em uma resolução espacial de 15m (Wahi *et al.*, 2013), ideal para interpretações geológicas e geomorfológicas (NASA, 2004). Segundo Ducart (2007), a banda adicional 3B (*backward*; localizada no visível e infravermelho próximo, com comprimento de onda entre 760 e 860 mm) em conjunto com a banda 3N (Nadir) permite a geração de modelos digitais de elevação (DEM – *Digital Elevation Model*).

Cada cena ASTER cobre uma área de 60km² e cobertura total da Terra se dá em 16 dias. Desde abril de 2016 estão disponíveis gratuitamente para download em sites como o Earth Explorer e GloVis, ambos da USGS.

Os dados fornecidos pelo ASTER são uma combinação de tecnologia de ponta e baixo custo, o que supera os sensores espectrais anteriores como aqueles dos satélites Landsat (Seoane *et al.*, 2009). Ao contrário do ETM+ Landsat, o ASTER consegue detectar melhor minerais de alteração, tais como caulinita e muscovita, caracterizados por uma banda de absorção na faixa correspondente à banda 6 do sensor ASTER (2,185-2,225 μm). Isso ocorre porque o ASTER possui uma melhor resolução espectral, principalmente na região SWIR, com 6 bandas, sendo que 5 delas (bandas 5-9) correspondem a somente uma do ETM+ Landsat (banda 7)

O ASTER foi o primeiro sensor orbital capaz de proporcionar imagens multiespectral na região do infravermelho termal (TIR), proporcionando a detecção de superfícies ricas em quartzo, carbonatos e outros silicatos. Visto que o quartzo é um dos principais minerais associados a rochas mineralizadas em muitos tipos de depósitos de ouro, inclusive os epitermais, a possibilidade de detectá-lo remotamente abriu e perspectivas promissoras para o uso de dados termais ASTER na exploração mineral, principalmente na patagônia e terrenos análogos, como feito por Ducart (2007).

CAP 4 --- Geologia Regional e Contexto Geotectônico

Na porção meridional da Província Mantiqueira, denominada de escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG), afloram rochas relacionadas aos eventos Riáciano-Orosiriano (Paleoproterozoico) e Panafricano/Brasiliano (Neoproterozóico), no contexto de formação do paleocontinente Gondwana.

O ESRG pode ser subdividido em quatro domínios definidos por suas características estruturais, petroectônicas, isotópicas e limitados por expressivas estruturas tectônicas (Borba, 2006). Várias designações são empregadas por diferentes autores para representar as mesmas áreas delimitadas pelas mesmas estruturas. Por esse motivo adotou-se a divisão do ESRG em: domínios Taquarembó, São Gabriel, Tijucas e Pelotas, assim como Hartmann *et al.* (2007) e Philipp *et al.* (2016) (Figura 13). Um resumo dos eventos que ocorreram no ESRG pode ser encontrado na Tabela 8.

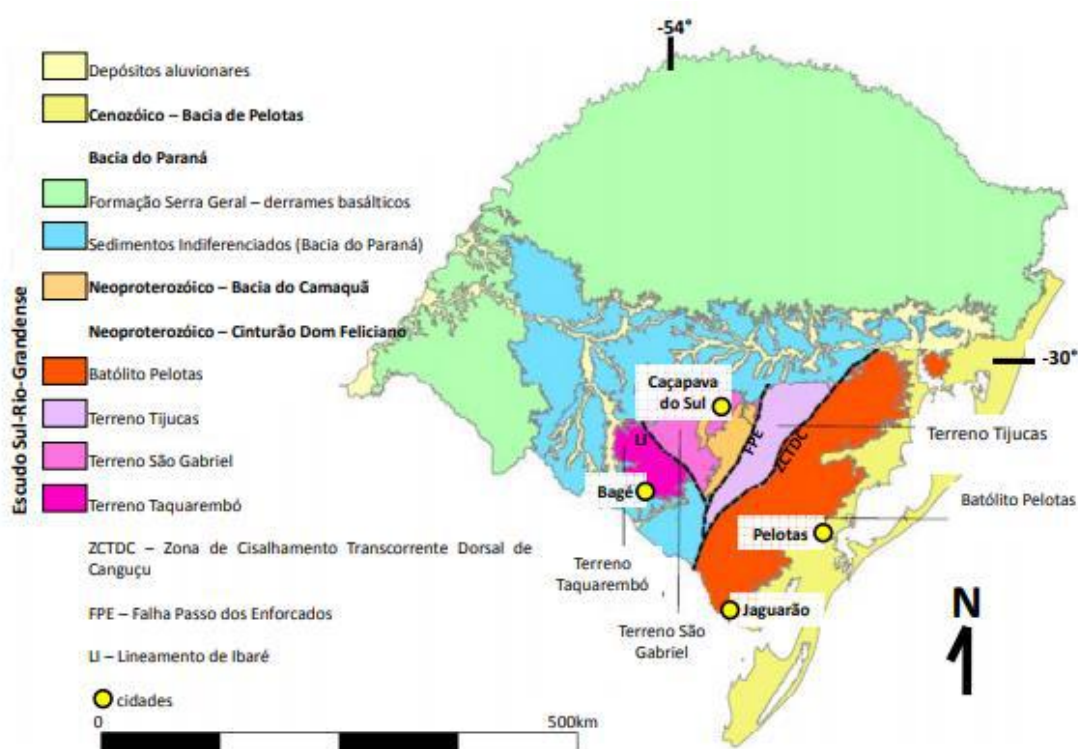


Figura 13: Domínios tectônicos do Rio Grande do Sul, CPRM (2006) modificado por Travassos (2014)

O Bloco Taquarembó, aflorante ao sul do lineamento de Ibaré, representa o cráton Rio de La Plata/ microplaca Nico Perez (Philipp *et al.*, 2016). É composto por granulitos básicos a ácidos, de composição original tonalítica e Trondhjemitica, além de piroxenitos, anortositos e lherzolitos, rochas paleoproterozóicas pertencentes ao Complexo Granulítico Santa Maria Chico. Datações U-Pb em zircões indicaram idades entre 2,55 e 2,35 Ga para os protólitos e de 2,02 para o metamorfismo deste complexo (Borba, 2006). Foi parcialmente retrabalhado durante o Ciclo Brasileiro, além de ter sido recoberto por rochas vulcano-sedimentares tardi- a pós-orogênicas (Viana, 2012) da Bacia de Camaquã.

O Domínio São Gabriel, também referido como Faixa Vila Nova, aflora a norte do lineamento Ibaré e a oeste da Sutura de Caçapava do Sul (Figura 14), é dividido em duas assembleias petroectônicas: Terreno Metamórfico de Acresção Palmas e Associação Vulcano-Plutono-Sedimentar Seival (AVPSS), ambas deformadas durante o Evento São Gabriel (850-700 Ma). O Terreno Metamórfico de Acresção Palmas é subdividido em: Complexo Cambaí, representado por gnaisses de composição monzonítica, diorítica, tonalítica, trondhjemítica e granodiorítica (TTG), intercalados com anfibolitos, meta-ultramafitos, metagabros, mármore e metapelitos metamorfizados em fácies anfibolito médio a inferior (Chemale Jr., 2000), apresentando idades U-Pb entre 879 ± 14 e 703 ± 13 Ma Leite *et al.* (1998 apud Borba, 2006); e Supercomplexo Vacacaí, com idades entre 753 ± 2 (Machado, *et al.*, 1990) e 705 ± 2 Ma (Hartmann, *et al.*, 2003), representado por complexos de rochas vulcano-sedimentares deformadas e metamorfizadas em fácies xisto-verde a anfibolito inferior, além de corpos básico-ultrabásicos estratiformes.

A AVPSS é composta por rochas vulcanossedimentares da Bacia de Camaquã e por intrusões graníticas sin- a tardi-orogênicas em relação ao Evento Dom Feliciano/ Panafricano-Brasiliiano (650-500 Ma) em ambiente de retroarco. (Bongiolo, 2006). Tanto o AVPSS quanto o Terreno Metamórfico de Acresção Palmas são prospectáveis para metais nobres, metais base e consumos agrícolas.

O domínio Tijucas, também chamado de Santana da Boa Vista é limitado a oeste pela sutura de Caçapava do Sul e a leste pela zona de cisalhamento Dorsal do Canguçu. É composto pelas rochas pertencentes ao complexo Encantadas, ortognaisses granodioríticos e tonalitos, recobertas, de forma discordante, por rochas supracrustais Neoproterozóicas do Complexo Porongos (783 ± 6 Ma).

O Domínio Pelotas é limitado a oeste pela zona de cisalhamento Dorsal do Canguçu (ZCTDC) e recoberto a leste pelos sedimentos Cenozóicos da Planície Costeira, é constituído por rochas graníticas relacionadas aos estágios colisionais e pós-colisionais do Ciclo Panafricano-Brasiliiano. Rochas intrusivas sintectônicas a ZCTDC possuem idades entre 658-625 (regime transpressivo) e 625-600 (regime transtrativo). Fora da zona de cisalhamento afloram a suíte intrusiva Pinheiro Machado e as suítes Erval, Viamão e Encruzilhada, todas apresentam xenólitos de orto- e paragnaisses, anfibolitos, metapelitos e mármore Paleoproterozóicos (Philipp & Machado, 2002).

Idade	Domínio Taquarembó	Domínio São Gabriel	Domínio Santana da Boa Vista (Tijucas)	Domínio Pelotas
Neoproterozóico	600-540 Ma- Vulcanismo do Platô do Taquarembó e Intrusão das suítes Santo Afonso e Saibro	560 a 540 Ma- Magmatismo alcalino Fm. Acampamento Velho e granitóides Caçapava, Ramada, São Sepé 600 a 580 Ma- Magmatismo shoshonítico- Fm. Hilário e granitóides de Lavras do Sul	543±6 Ma- Magmatismo alcalino gnaisses Capané	612 a 550 Ma- Magmatismo pós-colisional: suítes Pinheiro Machado, Erval, Viamão, Encruzilhada e Dom Feliciano
		705±2Ma Platô oceânico Vacacaí 753±2Ma -Vulcanismo Supercomplexo Vacacaí 879±14Ma- Magmatismo precoce do Complexo Cambaí: o arco de ilhas Passinho	783±6 Ma- idade magmática das vulcânicas ácidas do Complexo Porongos e deposição das metassedimentares	658 a 600Ma- magmatismo sintectônico a ZCTDC
Mesoproterozóico				
Paleoproterozóico	2,02Ga- metamorfismo fácies granulito no Complexo Santa Maria Chico 2,55 a 2,35 Ga- magmatismo TTG protólitos do Complexo Santa Maria Chico		2,27 e 2,16 Ga- isócronas Rb-Sr do Complexo Encantadas	Orto- e paragneisses, anfibolitos, metapelitos e mármores, presentes como xenólitos nas unidades do Neoproterozóico

Tabela 8: Resumo dos eventos em cada compartimento do Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG), extraído de Borba (2006).

4.1 Geologia da área

A área de estudo está localizada majoritariamente no Bloco São Gabriel e parte no Bloco Taquarembó, dois terrenos do oeste do Escudo Sul- Rio-Grandense que consistem, respectivamente, de associações de arco magmático toniano-criogeniano (900 – 700 Ma) e da borda do Cráton Rio de La Plata. Representam o antepaís durante a Orogênese Dom Feliciano, ocorrida no Leste (Gastal, et al., 2015).

As rochas que ocorrem na área de estudo são representadas pela associação plutono-vulcânica pertencente ao Complexo Intrusivo Lavras do Sul, pela sequência vulcanossedimentar da Bacia de Camaquã e parte da Bacia do Paraná. O Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS) e vulcânicas cronocorrelatas foram formados no final do Neoproterozóico no Escudo Sul-Rio-Grandense, e hospedam ocorrências importantes de Au-Cu.

Unidades aflorantes

O embasamento é composto pelas unidades para- e ortoderivadas do Complexo Granulítico Santa Maria Chico, de idade sideriana, e pelas unidades toniano-criogenianas que afloram a oeste do CILS e são representadas, na porção sul, pela sequência metassedimentar da Formação Arroio Marmeleiro e pelo Complexo Máfico-ultramáfico Cerro Mantiqueira, tectonicamente imbricados a ortognaisses do Complexo Imbicui, que são intrudidos pelo metatonalito Meireles (Gastal, et al., 2015), pelo granodiorito Fazenda do Posto, metaforito Passinho e Metagranitóides Sanga da Cacheiro (Laux, 2017). Já a porção norte é representada pelo Arroio Branquilha, o tonalito Arroio dos Carros e ortognaisses do Complexo Metamórfico Vacacaí.

No Criogeniano também afloram rochas máficas-ultramáficas representadas pelo Gabro Mata Grande, Maciço Pedras Pretas e Gabro Santa Catarina, estratiformes, e pela Fm. Cerro do Ouro do Complexo Metamórfico Palmas, interpretada como ofiolitos. Na área o Complexo Cambaí, além dos gnaisses, apresenta lentes de mármore, metamafitos e anfibolitos associados.

Na porção Sudoeste, a Suíte Lagoa da Meia Lua, composta por granitos, tonalitos, granodioritos e dioritos, representa uma série de granitoides relativas a regime de arco (700-640 Ma). Granitos peraluminosos (700-650 Ma) são representados pelo Sienogranito Camaquã Pelado e Granito São Manuel.

Na porção Sudeste, ocorrem alguns afloramentos do Complexo Metamórfico Porongos representados por uma sequência supracrustal pelito carbonática com vulcanismo subordinado, e metamorfismo da fácies xisto-verde

A Suíte Caçapava do Sul (metagranitóides variando a composição de sienito a monzograníticos), e o granito Fazenda do Posto (granodiorito) são sintectônicos a transcorrência (Porcher & Lopes, 2000). Durante o Ediacarano ocorre magmatismo tardi a pós- tectônico, responsável pela intrusão da Suíte Santo Afonso (monzogranitos), Suíte Cerro Preto (tonalitos e granodioritos) e Complexo Ígneo Lavras do Sul, que será melhor detalhado ao longo deste capítulo. Ao mesmo tempo, começava a se depositar as sequências sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia de Camaquã. Vale ressaltar que a Suíte Santo Afonso apresenta alteração fílica em sua parte central.

No cambriano, ocorre a intrusão de uma série de granito pós colisionais: Granito Saibro, Granito São Sepé, Granito Cerro da Cria, Granito Ramada, Granito Macedo e Granito Jaguari. Na bacia de Camaquã, depositam a Fm. Acampamento Velho e na transição para o Ordoviciano, a Fm. Santa Bárbara. Neste período deposita a Fm. Guaritas, encerrando a deposição na bacia.

Posteriormente, ocorrem as rochas Permianas da Bacia do Paraná, seguidas pelas coberturas Cenozóicas da Fm. Santa Tecla (terciária) e sedimentos aluvionares atuais.

A literatura utilizada reconhece a presença de alteração hidrotermal na associação plutono-vulcânica pertencente ao Complexo Intrusivo Lavras do Sul, e parte da sequência vulcanossedimentar da Bacia de Camaquã. Por esse motivo essas unidades serão detalhadas a seguir. Como aflora em boa parte da região sul da área, o mesmo será feito com as unidades da Bacia do Paraná. O Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS) e vulcânicas cronocorrelatas foram formados no final do Neoproterozóico no Escudo Sul-Rio-Grandense, e hospedam ocorrências importantes de Au-Cu.

A Bacia de Camaquã

A Bacia do Camaquã engloba uma sequência Vulcano-sedimentar com idades do Neoproterozóico ao Ordoviciano (Figura 14), depositadas nas fases tardi- a pós-colisionais do Ciclo Brasileiro, sendo uma das mais bem preservadas bacias molássicas do mundo (Paim *et al.*, 2014). Cinco unidades são reconhecidas: Maricá, Bom Jardim, Acampamento Velho, Santa Bárbara e Guaritas.

A unidade basal é dada pelo Alogrupo Maricá (ou Fm. Maricá), composta por arenitos, folhelhos, siltitos e conglomerados. Seus depósitos representam uma retrogradação, em que sistemas fluviais evoluem para deltaicos e posteriormente marinhos rasos. Esta unidade é afetada por dobras suaves e falhas diversas. Paim *et al.* (2014) assumem que a deposição tenha ocorrido entre 630 e 600 Ma., sendo interpretada como uma bacia de retro-arco de antepaís vinculada ao estágio tardi-orogênico.

O Alogrupo Bom Jardim compreende uma unidade vulcano-sedimentar, gerada em ambientes continental lacustre e aluvial, que é composta por rochas sedimentares siliciclástica e vulcanoclástica, fluxos piroclásticos e lavas andesíticas. Também afetado por dobras suaves e falhas diversas, sua deposição é estimada entre 593 ± 6 e $580 \pm 3,6$ Ma em duas bacias transcorrentes associadas às fases tardi-orogênicas em um contexto de *back arc* (Paim *et al.*, 2014).

Borba 2006 subdivide em duas unidades: A Fm. Hilário representa as rochas vulcânicas e vulcanoclásticas intermediárias de assinatura calcialcalina alto-K a shoshonítica, em ambiente vulcânico continental, formando um estrato-vulcão com presença de corpos d'água; e a Fm. Arroio dos Nobres compõe a parte sedimentar, sendo relacionada à progradação de deltas entrelaçados, em que fácies turbidíticas distais gradam para turbiditos proximais, frentes deltaicas e níveis pelíticos com gretas de contração (Pereira, 2011) em lagos relativamente profundos (Paim *et al.*, 2014).

O Alogrupo Santa Bárbara representa mais uma sucessão vulcano-sedimentar e engloba as formações Acampamento Velho e Santa Bárbara, sendo depositado entre 574 ± 7 e 549 ± 5 Ma.

A Fm. Acampamento Velho representa uma sucessão vulcânica bimodal em ambiente subaéreo, com rochas basálticas na base e riolíticas no topo, relacionada a um ambiente tectônico extensional pós-orogênico (Pereira, 2011). A Fm. Santa Bárbara é composta por arenitos, conglomerados e siltitos avermelhados de origem continental, associação de leques aluviais, frente deltaica aluvial, lacustre e de canais fluviais entrelaçados. Esta sucessão foi interpretada como gerada em sistemas de riftes (Paim *et al.*, 2014).

O Alogrupo Guaritas (também chamado de Fm. Guaritas) registra o último episódio tectono-sedimentar da BC, é composto por arenitos, conglomerados e siltitos, em duas sequências eólicas (unidade Pedra Pintada) e uma de origem fluvial (unidade Varzinha). Na base, ocorrem derrames de rochas basálticas alcalinas, denominada de Mb. Rodeio Velho. Foi depositada em clima árido a semi-árido, em sistema rifte, que pode representar o rifteamento precursor da Bacia do Paraná (Pereira, 2011).

A Fm. Pedra Pintada é composta por campos de dunas intercalados com depósitos de fluxo de detritos, provenientes da borda ativa do rifte, depositada entre 535 e 522 Ma. A Fm. Varzinha é atribuída ao estágio pós-rifte, registra sistemas fluviais, deltaicos e planícies de inundação, tendo sido depositada entre 520 e 510 Ma. (Paim *et al.*, 2014). O Membro Rodeio Velho ocorre na base deste grupo, possui idade entre 547 e 535 Ma e é composto por derrames de basalto alcalinos. Paim *et al.* (2014) associam a esse magmatismo o início do rifte e o fim da deposição molássica, juntamente com o término da subducção e geração de magmas.

As rochas aflorantes na área de estudo incluem principalmente as sequências sedimentares e vulcânicas ediacaranas a cambrianas da formação Maricá (arenitos arcoseanos a conglomeráticos com níveis de pelitos) e da Formação Hilário (lavas andesíticas). Esta sequência é intrudida por *stocks* de quartzo monzonito porfirítico e pelo granito peralcalino Estrela (Gastal, et al., 2015).

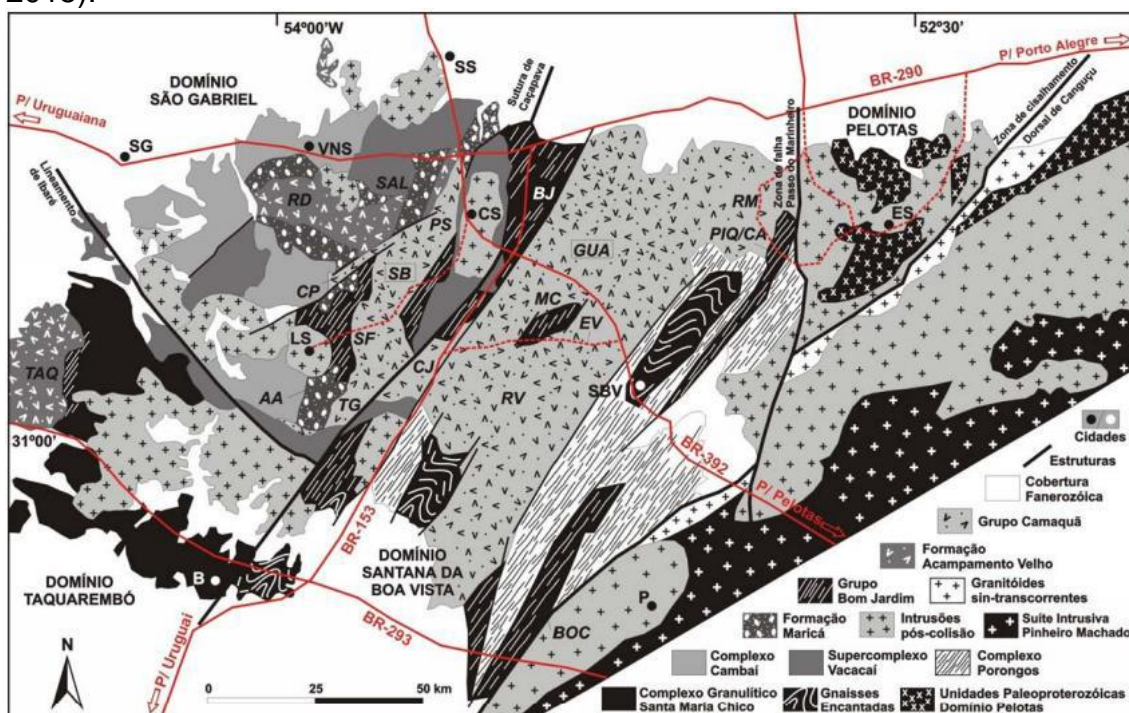


Figura 14: Mapa geológico mostrando os quatro domínios: Taquarém, São Gabriel, Tijuca (Santa da Boa Vista) e Pelotas. Dando destaque a Bacia de Camaquã, no centro da figura. Cidades: B - Bagé, SG - São Gabriel, LS - Lavras do Sul, VNS - Vila Nova do Sul, SS - São Sepé, CS - Caçapava do Sul, SBV - Santa da Boa Vista, ES - Encruzilhada do Sul, P - Piratini. Extraído de Borba (2006).

O complexo intrusivo Lavras do Sul

Ao redefinirem o Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS), Gastal & Lafon (1998), reinterpretaram as fácies graníticas e incluíram os monzodioritos, monzonitos e quartzo monzonitos que ocorrem a norte, admitindo a contemporaneidade entre os eventos shoshoníticos e alcalinos supersaturados (Figuras 15a e 15b).

O CILS pode ser dividido em dois setores. No Norte está o monzonito Tapera, e o setor sul consiste no corpo granítico principal, denominado de Granito Lavras do Sul, entre eles ocorre o monzodiorito Arroio do Jacques. Intrude ortognaisses do Complexo Cambaí e granitóides pré a sin tectônicos, além das formações Maricá e Hilário, unidades basais da Bacia de Camaquã, gerando leve metamorfismo de contato nos arenitos.

O monzonito Tapera - MT é uma intrusão em forma de meia-lua constituída por quartzo monzonito, monzonito, monzodiorito e dioritos. Na borda externa o monzodiorito apresenta foliação magmática subvertical, enquanto que seu centro é pouco foliado. Seu contato brusco ou transicional com os pequenos *stocks* de quartzo monzonito porfirítico (QMP), levou a interpretação destes como a fácies porfirítica do Monzonito Tapera (Gastal, et al., 2006). O QMP também intrude o Monzodiorito Arroio do Jacques e rochas da Fm. Hilário.

O monzodiorito Arroio do Jacques (MAJ) é um corpo alongado e estreito entre o MT e o Granito Lavras (GL), é formado por diorito (gabro) com ortopiroxênio e monzodiorito, com distribuição zonada. A presença de tipos híbridos sugere mistura entre o MT e o MAJ. Suas idades próximas, 601 ± 5 Ma para o MT e 599 ± 7 Ma para o MAJ, colaboram para o modelo de serem contemporâneos.

O corpo principal é uma intrusão granítica centrada com zonalidade reversa de fácies, álcali-cálcicas (granitos do núcleo) e alcalinas. O núcleo é formado por duas fácies: biotita granodiorito (BG) na porção central, circundado pelo anfibólio-biotita monzogranito (ABM) que grada para anfibólio-biotita sienogranito. Já as bordas são representadas por biotita-anfibólio sienogranito (BAS) e pertita granito (PG). O anfibólio principal é a hornblenda. Pela geoquímica, os termos do núcleo são álcali-cálcicos, enquanto que o PG evoluiu até composições fracamente peralcalinas (Gastal & Lafon, 2006).

As idades Pb-Pb são de 601 ± 2 Ma para o BG, e 598 ± 3 Ma para o BAS, sugerindo que este tenha se formado durante um mesmo evento ígneo ou em episódios muito próximos aos de formação do MT e MAJ. O Pertita Granito aparenta ter zircões herdados, com recristalização na borda, sua idade mais aproximada é $586,0 \pm 2,8$ Ma.

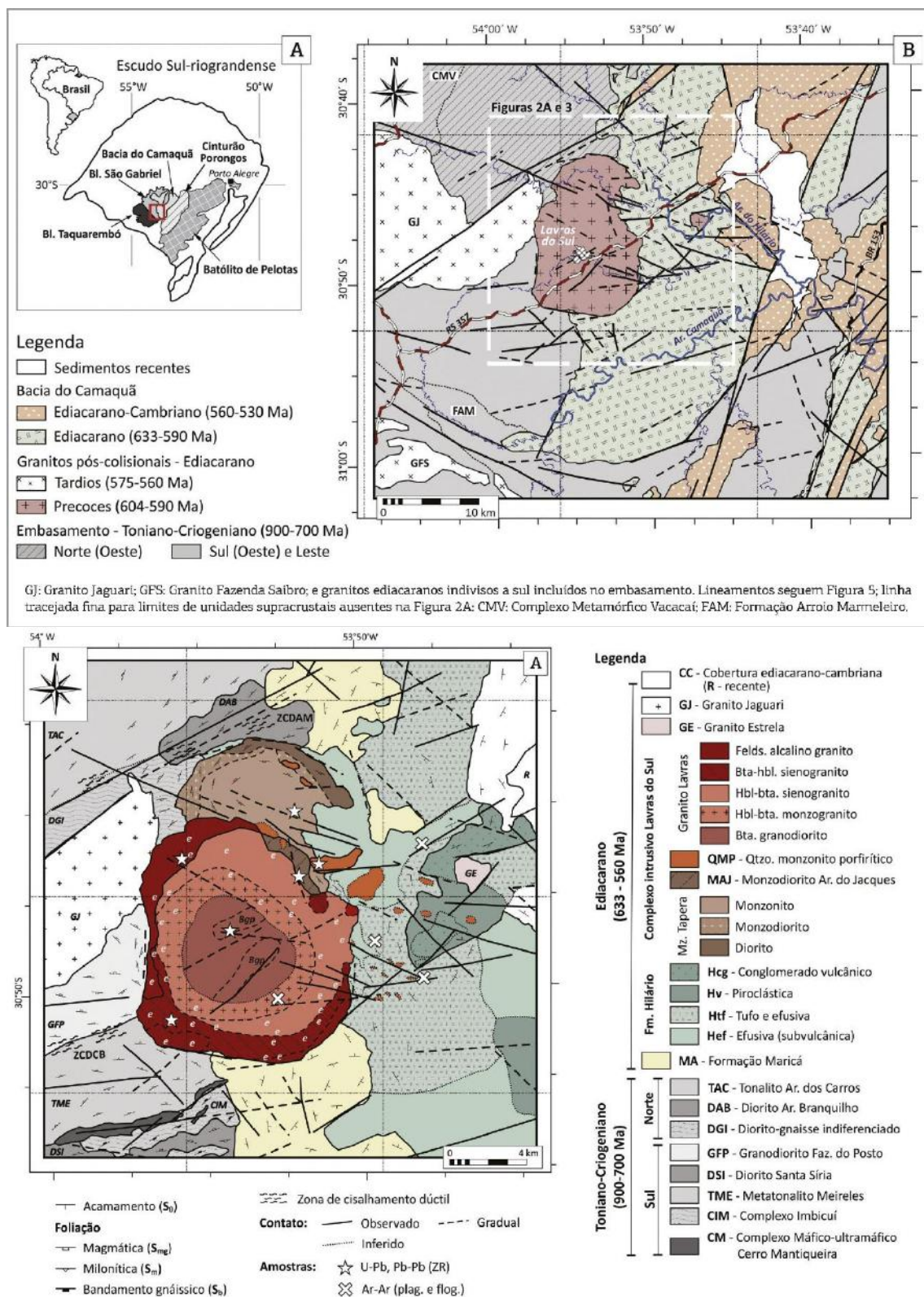


Figura 15: Mapas Geológicos do CILS: a) mapa simplificado da região de Lavras do Sul, unidades e idades; b) mapa geológico do Complexo Intrusivo Lavras do Sul. Ambos extraídos de Gastal et al. (2015)

O granito Estrela ocorre cerca de 7 km a NE do Granito Lavras do Sul, sendo um pequeno (2 x 1 km) plug na interseção de duas zonas de falha, de direção N75°W e N300E, é formado por K-feldspato granito e biotita sienogranito subordinado, ambos correlacionados a granitos alcalinos do CILS, e intrude tufos, conglomerados vulcânicos e brechas piroclásticas de composição quartzo monzonítica.

O granito Jaguari (GJ) tem idade 567 ± 4 Ma, é constituído por biotita sienogranito dominante e monzogranito subordinado, todos metaluminosos e alcalinos, representa o estágio mais novo e distinto daquele que originou os granitos de mesma afinidade no CILS (Gastal, et al., 2006).

Todos os granitoides são classificados como granitos pós-colisionais, sendo os termos alcalinos (BAS e PG) e o sienogranito híbrido plotam no campo de granitos intraplaca, e os demais no de granitos de arco vulcânico (Gastal & Lafon, 2006). O CILS é cronocorrelato a Fm. Hilário, enquanto que o Granito Jaguari é cronocorrelato da Fm. Acampamento Velho da Bacia do Camaquã.

Através da gravimetria Gastal *et al.* (2006) perceberam um alinhamento W-E de duas anomalias gravimétricas na porção centro do *pluton* granítico, que coincide com a região onde estão concentrados os diques de dacito-riodacito e as mineralizações de Au-Cu. As anomalias representam as raízes alimentadoras da intrusão, enquanto que o alinhamento pode representar importante zona de fraturas profundas que condicionou a ascensão dos magmas graníticos. Com os dados disponíveis os autores optaram pela interpretação em que a formação do CILS se deu em um intervalo inferior a 22,8 Ma, estando o principal evento ígneo ao redor de 603-597 Ma.

Todo o complexo é cortado por enxames de diques de diferentes composições (Figura 16), a exemplo dos diques máfico-ultramáficos lamprofíricos de direção WNW-ESE a NW-SE ocorrem indistintamente no GL, que são frequentes junto às zonas mineralizadas em testemunhos de sondagem.

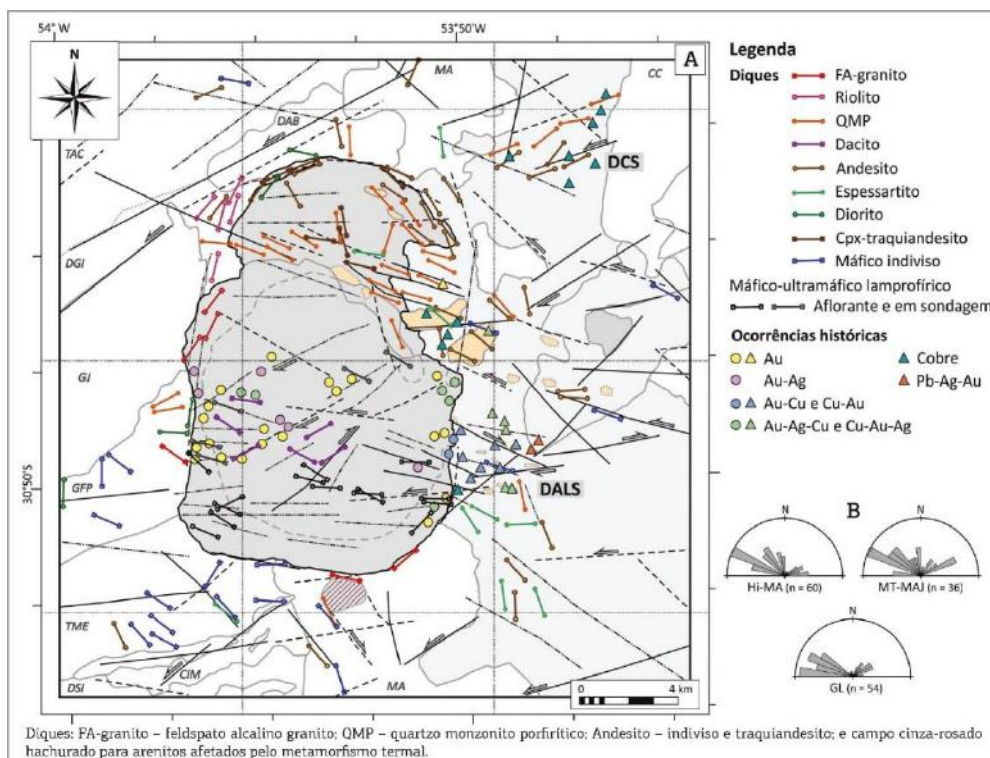


Figura 16: Mapa de diques e ocorrências minerais ao redor do CILS. Extraído de Gastal et al. (2015)

Apoiados pela relação de campo, lineamentos magnéticos e geocronologia Gastal et al. (2006) inferiram que o CILS pode ser a contraparte em profundidade de um sistema vulcano-plutônico de subsidência. Gastal et al. (2015) propõem um modelo integrado para a evolução do CILS, controlado por ciclos sucessivos de subsidência-ressurgência da câmara magmática. Esse processo intensifica o fraturamento, facilitando a intrusão, erupção e o desenvolvimento de amplo sistema magmático-hidrotermal. O Granito Lavras representa um plúton ressurgente, falhas a ele associadas são o principal controle das mineralizações, sugerindo que as mineralizações auríferas estão relacionadas ao último episódio de ressurgência em um centro vulcano-plutônico maduro.

A Bacia de do Paraná

Quase todo o estado do Rio Grande do Sul está recoberto por rochas relativas à Bacia do Paraná, como mostra o mapa de domínios tectônicos. Esta grande sinéclise paleozóica estende-se por cerca de 1,5 milhão Km², possuindo uma espessura total máxima em torno dos 7 mil metros, que compreende um pacote sedimentar-magmático de rochas do Ordoviciano ao Cretáceo (Milani *et al.*, 2007).

Na área de estudos afloram as unidades Permianas da Bacia do Paraná, que consistem principalmente nos Grupos Itararé, Guatá e Passa Dois, correspondentes a supersequência Gondwana I de Milani *et al.* (2007). A seguir, um resumo destas unidades.

A Supersequência Gondwana I engloba pacotes sedimentares do Neocarbonífero ao Eotriássico, envolvendo diversas condições deposicionais, desde um contexto glacial até um amplo e árido interior continental.

Durante boa parte do Eocarbonífero, o Gondwana sul-ocidental se encontrava a grandes latitudes com extensa glaciação continental que inibia a sedimentação. A progressiva migração do paleocontinente para norte possibilitou a sedimentação em um contexto periglacial, representados pelos depósitos sedimentares de origem glácio-marinha do Grupo Itararé (neocarbonífero-Eopermiano). Este grupo é constituído pelas formações Lagoa Azul, Campo Mourão, Taciba e Aquidauana.

O degelo promoveu aumento do nível do mar, possibilitando a deposição do Grupo Guatá. Este é composto pelas rochas de ambiente deltaico, marinho e litorâneo da Formação Rio Bonito e marinhos da Formação Palermo, com a superfície de inundação máxima na sua parte intermediária. A Fm. Rio Bonito tem grande importância econômica, pois nela são encontrados depósitos de carvão e ocorrências de Urânio. Esta unidade é dividida em três membros: Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis (turfeiras sob condições de lagunas restritas que deram origem aos níveis de carvão). A Formação Palermo é constituída por siltitos, arenitos com estratificação do tipo hummocky e folhelhos cinza-escuros, que foram interpretadas como um horizonte de máxima inundação.

O Grupo Passa Dois registra um momento regressivo, com as rochas marinhas e transicionais na base até o início da instalação de clima desértico, no topo. O grupo é composto pela Fm. Irati (momento de restrição das águas, gerando depósitos de carbonatos e evaporitos na porção proximal e folhelhos betuminosos na porção distal), de importância econômica por possuir rochas geradoras de óleo e gás; pela Fm. Serra Alta (pacote de folhelhos cinza-escuros finamente laminados, produto de decantação de argila em um contexto marinho de baixa energia) que representa a última grande incursão marinha na bacia; A tendência regressiva é mais expressiva quando os depósitos da Fm. Teresina(depósitos pelíticos com ação de marés) são sucedidos pela Fm. Rio do Rasto(lobos deltaicos, pelitos lacustres, arenitos eólicos e depósitos fluviais), encerrando a deposição da Supersequência Gondwana I.

Vale ressaltar que todas as idades foram retiradas da bibliografia e obtidas por datação isotópica em zircões pelo método Pb-Pb ou U-Pb.

4.2. Histórico de mineralizações

Na região de Lavras do Sul, existem registros de atividade garimpeira na região desde o século XVIII. No início do século XIX pesquisadores do Serviço Geológico do Brasil fizeram as primeiras descrições das ocorrências de Au, Cu, Pb, Zn e Ag ao redor de Lavras do Sul. Várias pesquisas foram realizadas durante a segunda metade do século XX, com destaque para os trabalhos detalhados feitos pelo DNPM na década de 1950, e os levantamentos da CPRM na década de 1970. Novos mapas feitos pela CPRM na década de 2000 mostram o potencial metalogenético da área de estudos.

São reconhecidos dois distritos mineiros: o Distrito Aurífero Lavras do Sul (DALS) e o Distrito Cuprífero Seival. Os prospectos DALS estão distribuídos no granito Lavras (Au± Cu± Ag) e na sequência vulcânica (Cu- Au- Pb± Ag). O minério possui teores que variam de 0,3 a 16 g/ton de Au, consiste de pirita aurífera e Au livre subordinado, associados a veios de quartzo e na forma disseminada (Gastal, et al., 2015).

A gênese das mineralizações está associada a eventos do tipo pórfiro - epitermal, sendo relacionadas a estruturas de direção N40°E e E-W (Bongiolo, 2006).

Bongiolo (2002) reuniu as principais ocorrências de Au e Cu, na região de Lavras do Sul, em uma tabela, com o nome da mina/garimpo, suas características e teores (Anexo).

CAP 5 --- RESULTADO E DISCUSSÃO

Como visto anteriormente, as litologias em que as anomalias aparecem foram determinadas a partir de quatro mapas geológicos, correspondentes as folhas Cachoeira do Sul e Pedro Osório, na escala 1:250.000 e as folhas Bagé e Lagoa da Meia Lua, na escala 1:100.000, todas realizadas pela CPRM.

Para facilitar o reconhecimento das anomalias, suas delimitações receberam cores diferentes, como mostra a tabela 3. A primeira análise resultou em 174 anomalias. Contudo, nem todas eram válidas, 13 correspondiam a “falsas anomalias”. Após sua exclusão, foram reconhecidas 161 áreas anômalas divididas em: 29 de 6 minerais, 29 de 5 minerais, 76 de 4 minerais, e 27 de 3 minerais, como mostra a tabela 9.

COR	ANOMALIA	NÚMERO DE ÁREAS
Vermelho	6 minerais	29
Laranja	5 minerais	29
Amarelo	4 minerais	76
Verde	3 minerais	27
Preto	Falsas anomalias	13

Tabela 9: Tabela de anomalias

Para avaliar a importância de cada anomalia válida em relação a área de estudos, suas áreas foram calculadas (Tabela 10). Os resultados mostram que a soma de todas as áreas representa apenas 2,145% da área total, ou seja, para uma equipe de pesquisa, ter o conhecimento de áreas com potencial resulta em um tempo, e consequentemente custo, menor.

	Área (m ²)	Área (km ²)	Área (%)
Área de estudos	6831000000,000	6831	100%
Anomalia 3 minerais	21113259,016	21,11	0,309%
Anomalia 4 minerais	45108370,447	45,11	0,660%
Anomalia 5 minerais	33954489,450	33,95	0,497%
Anomalia 6 minerais	46351134,892	46,35	0,678%
Total áreas anômalas	146527253,805	146,53	2,145%

Tabela 10: Tabela de anomalias, suas áreas e relevância em porcentagem da área total.

As “Falsas Anomalias”

Várias concentrações de 6 minerais e de 3 minerais não representam áreas hidrotermalmente alteradas e sim áreas urbanas ou lagos, como mostram as imagens a seguir.

A cidade de Lavras do Sul (Figura17), por exemplo, resultou em uma anomalia de 6 minerais, na litologia certa (Granito Lavras do Sul) e próximo a conhecidas áreas mineralizadas. Essa concentração de minerais pode ser explicada por estarem relacionados ao uso de rochas que os contenham em telhados, concreto, brita, no asfalto e em outras obras urbanas. O mesmo ocorre na cidade de Bagé (Figura18), localizada sobre rochas da Suíte Santo Afonso (granodioritos e monzogranitos, sienogranitos e tonalitos).

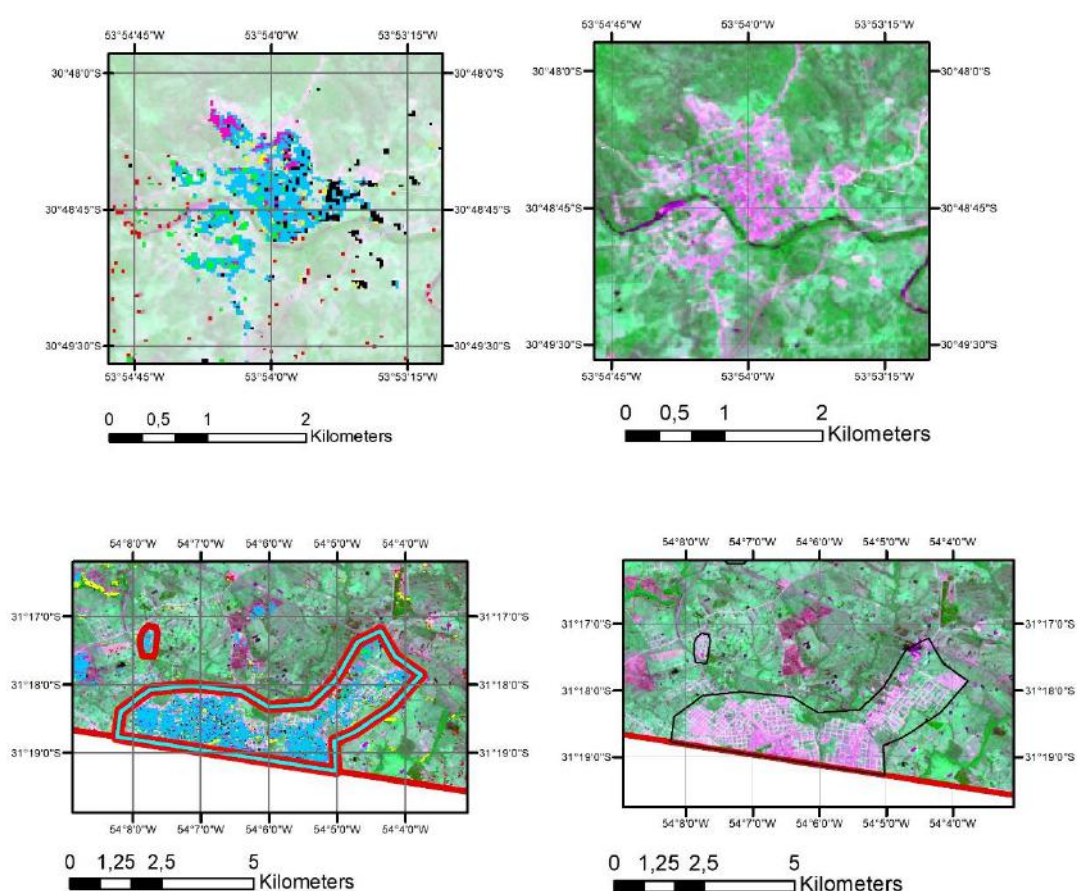


Figura 17: Falsa Anomalia Lavras do Sul

Figura 18: Falsa Anomalia Bagé

Já os lagos (Figura19), apresentam concentração de 3 minerais (caolinita, epidoto e clorita) isso deve-se ao fato desses açudes terem águas turvas, repletas de argilominerais em suspensão.

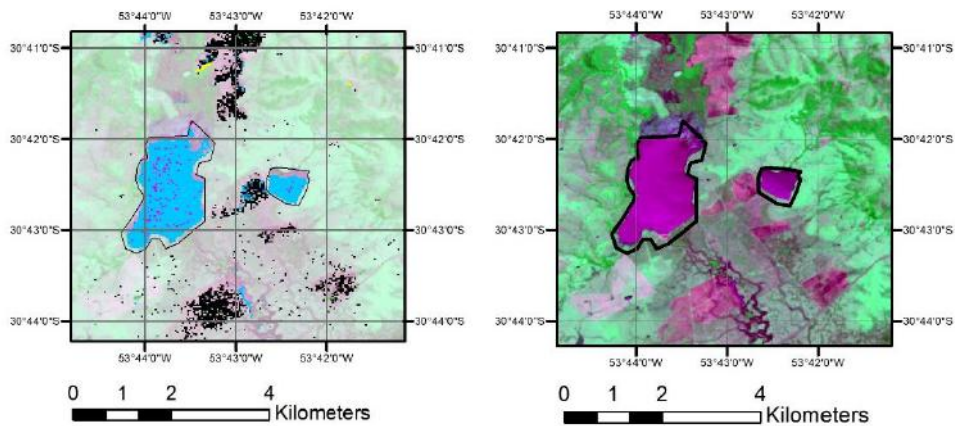


Figura 17: Falsa Anomalia lagos

Essas “falsas anomalias” também atrapalham a interpretação de áreas anômalas (Figura20). Como é observado na figura, junto a anomalia de 5 minerais ocorrem lagos, que possuem caolinita em suspensão, aumentando a quantidade de pixels desse mineral, sem que de fato corresponda a uma anomalia, ou seja, mascarando o real valor do mineral encontrado

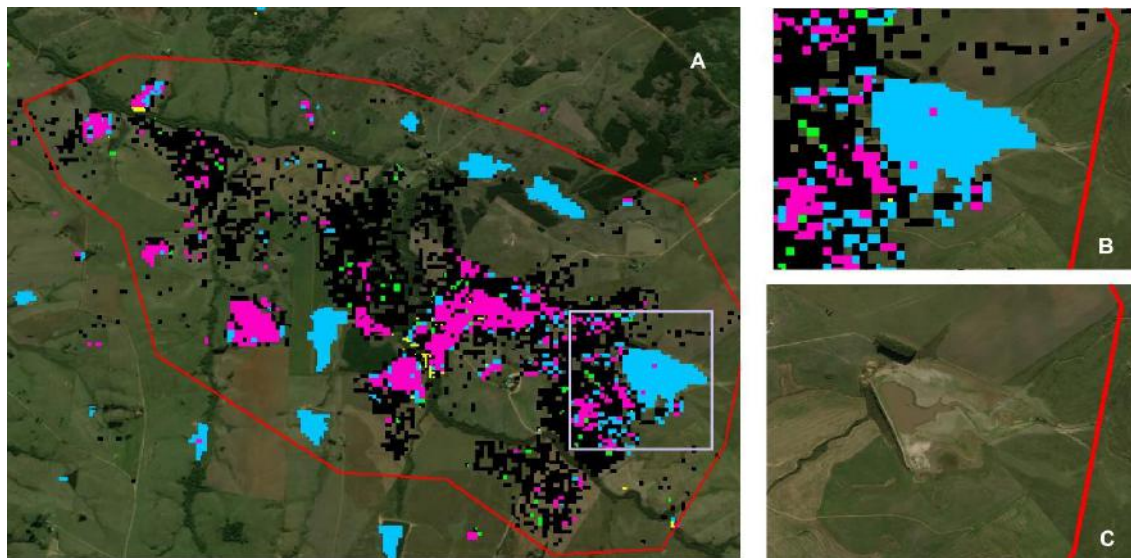


Figura 18: Falsa Anomalia- lagos em área anômala

Estas anomalias foram circundadas de preto e excluídas da classificação de possíveis alvos exploratórios.

Como visto anteriormente, as litologias esperadas eram os Granitoides e vulcânicas associadas, além dos granitoides de composição intermediária (tonalitos e dioritos e granodioritos) hoje gnaissificados. Porém, algumas anomalias estão sobre rochas sedimentares, ao exemplo das da Fm. Rio Bonito. Esse fato pode ser explicado, pois, na base das camadas de pelitos, característicos dessa formação, ocorrem níveis conglomeráticos, que ao se depositarem podem ter erodido os antigos depósitos, reconcentrando os minerais, e possivelmente o ouro, sem estar necessariamente ligado a atividade hidrotermal. A mesma explicação pode ser adotada para as anomalias em depósitos aluvionares atuais.

Algumas anomalias coincidiram com minas a céu aberto de calcário (Figuras 21a e b), este é usado como insumo agrícola. Duas hipóteses são plausíveis 1) os calcários sofreram alteração hidrotermal e podem estar mineralizados, ou seja, as minas também possuem ouro, mas não em níveis economicamente viáveis; e/ou

2) A remobilização do terreno para retirada do calcário acarretou em uma concentração artificial de minerais naturalmente presentes no solo (não há mineralização, apenas teor background artificialmente concentrado)

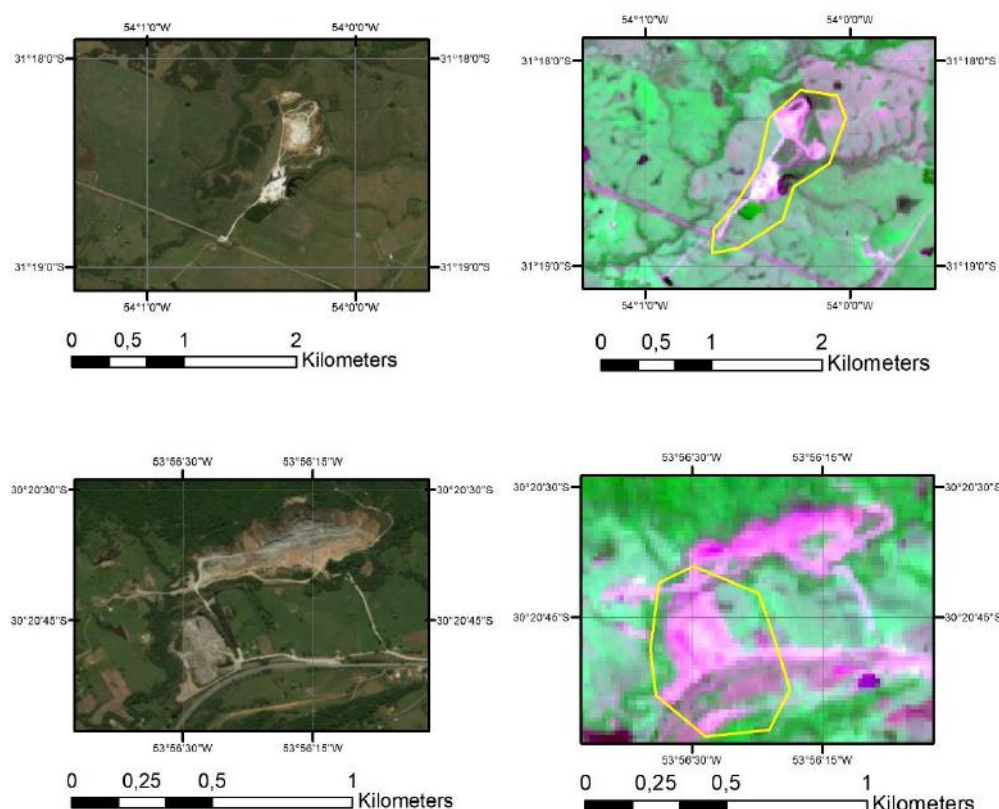


Figura 19 A e B: anomalias em Minas de calcário

A indisponibilidade de vetores geológicos (unidades geológicas, falhas, etc...) retardou o andamento do trabalho, deixando-o menos automatizado e dependente dos mapas, que como foram feitos por autores diferentes em momentos e escalas diferentes, não se casam nas cores utilizadas e nem no detalhamento estrutural.

Alvos em potencial

Ao sobrepor os resultados sobre a Carta Metalogenética da folha Cachoeiro do Sul, realizada pela CPRM no ano 2000, na escala 1:250000, percebe-se que algumas áreas são extremamente promissoras, como a região próxima a Cerrito do Ouro (Figura 22), onde cerca de dez áreas anômalas foram delimitadas, a maioria representa uma anomalia de 4 minerais. Todas foram plotadas em uma zona mapeada pela CPRM como anômala, com potencial moderado a alto para Au, onde a mineralização está condicionada por veios.

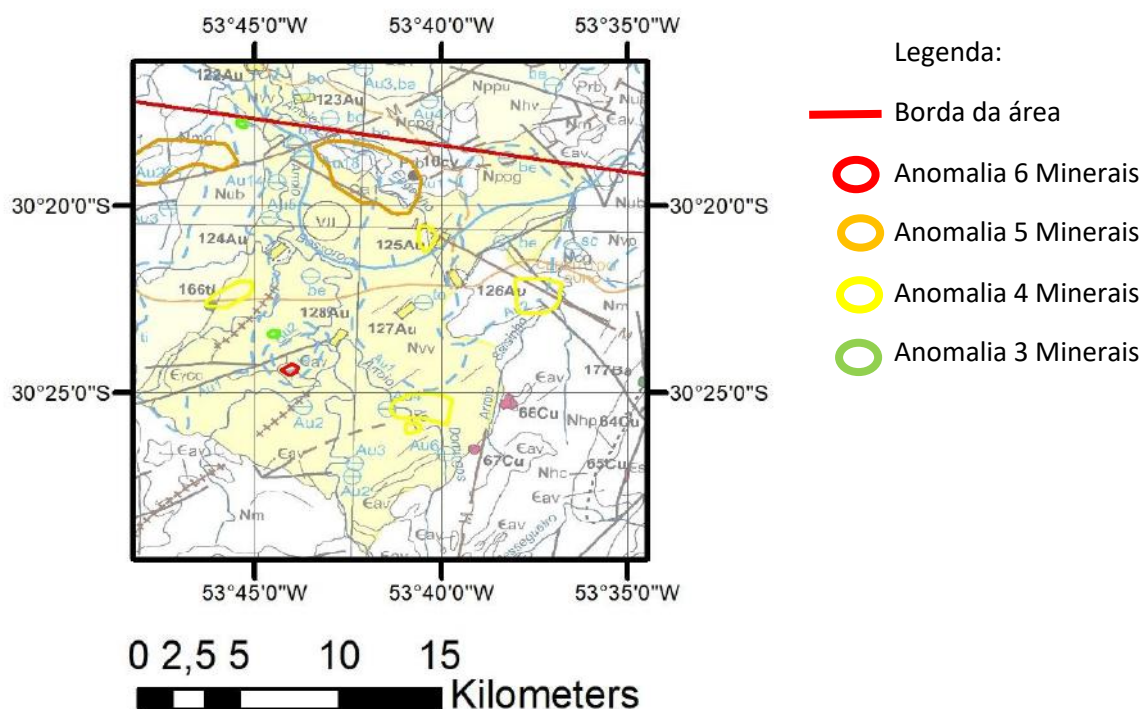


Figura 20: Áreas anômalas próximas a Cerrito do Ouro, com grande potencial para mineralização.

Na região a Norte de Caçapava do Sul, as anomalias se relacionam com ocorrências de cobre, associados a veios e de forma irregular. Na região de Lavras do Sul, assim como esperado, também ocorreram anomalias em áreas mapeadas pela CPRM como de alto potencial para Au, também associados a veios. Infelizmente os dados referentes as folhas Bagé e Lagoa da Meia Lua, porção Oeste da área, não estão disponíveis. Dessa forma, não foi possível deduzir se as anomalias encontradas estão associadas a áreas conhecidas ou não.

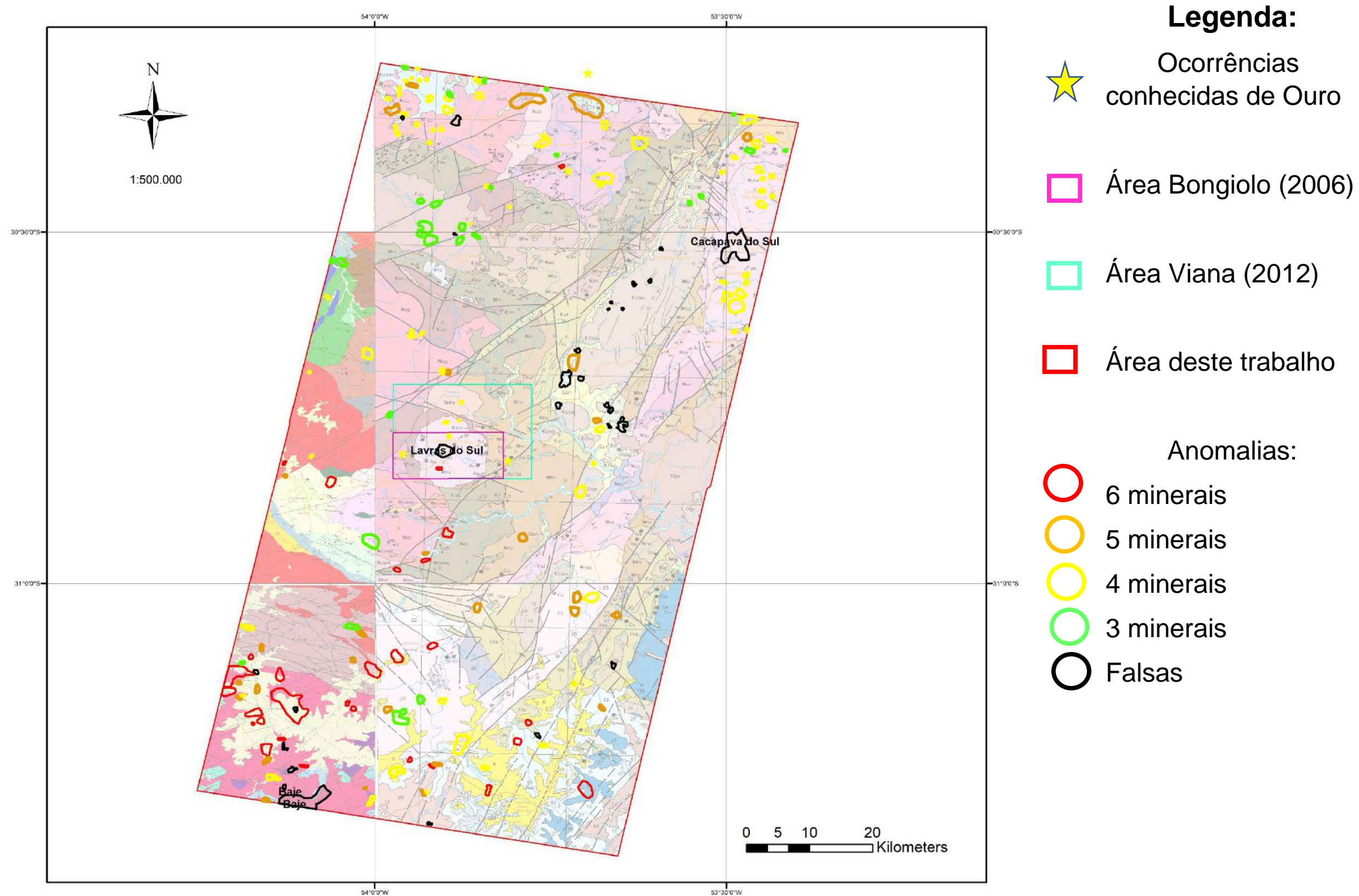


Figura 21: Áreas anômalas sobre a Junção dos Mapas Geológicos da CPRM: Folhas Bagé (NW) e Lagoa da Meia Lua (SW) na escala 1:125.000 e Folhas Cachoeiro do Sul (NE) e Pedro Osório (SE) na escala 1:250.000

CAP 6 --- CONCLUSÕES

A técnica Análise por Principais Componentes (PCA) se mostrou eficaz e produtiva nas imagens ASTER, gerando áreas anômalas próximas de mineralizações conhecidas e em novas áreas não exploradas. Como esperado, áreas com vegetação mais densa influenciam negativamente o resultado, enquanto que clareiras apresentam melhor sinal.

A caolinita, representante da alteração argílica avançada, também pode ser gerada pelo intemperismo. Na ausência de uma assinatura espectral bem definida para o interestratificado illita-esmectita, na biblioteca disponível, a illita foi uma boa substituta para a alteração argílica intermediária.

Como esperado, ocorrem anomalias próximas ao Granito Lavras do Sul, local com alterações hidrotermais e mineralizações comprovadas. Outras, relacionadas a rochas sedimentares, ocorrem espalhadas por todo o mapa. Também ocorrem anomalias que podem estar relacionadas a atividade hidrotermal ao redor de outros corpos intrusivos como os granitoides Caçapava do Sul e São Sepé a Norte, e a suíte Santo Afonso, aflorante a oeste de Bagé, na porção Sudoeste da área.

Com o avanço das tecnologias e sua disponibilidade ao público, cada vez mais as ferramentas de geoprocessamento ganham importância. A eficácia da técnica aplicada neste trabalho demonstra que a partir da bibliografia e dados de domínio público é possível reconhecer alvos para a pesquisa mineral.

Esse fato diminui os gastos e tempo necessários para identificação de possíveis depósitos, permitindo que uma empresa investigue novas áreas que antes poderiam ser descartadas por falta de recursos. Como visto, apenas 2,145% da área total têm potencial.

O reconhecimento da banda que continha as informações espectrais desejadas foi difícil, visto que o software ArcGIS 10.3. não permite a visualização da matriz de auto-vetores (a forma mais fácil de identificação), coube ao interprete discernir qual PC era a representante, para este trabalho a escolhida foi a PC3.

Outro fator limitador foi a indisponibilidade de vetores geológicos. Sua ausência reduz a velocidade das interpretações e pode comprometer a precisão, visto que a diferença de escalas e/ou qualquer discrepância dos mapas na hora do georreferenciamento pode significar que a anomalia se encontra em uma outra litologia ou está associada a alguma estrutura que previamente estava próxima, mas nem tanto, evitando que se estime a influência das estruturas para a mineralização de forma automática.

Recomenda-se para trabalhos futuros expandir para áreas vizinhas, explorando o potencial de Caçapava do Sul e arredores das Minas do Camaquã. Outra abordagem também é possível, utilizando satélites multiespectrais tal como o Sentinel-2

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apoio escolar 24 horas. (s.d.).
http://www.apoioescolar24horas.com.br/salaaula/estudos/fisica/035_ondas/#pag4-tab. Acesso em 02 de Fevereiro de 2018, disponível em Apoio escolar 24 horas.
- Binotto, R. B. (2015). *Identificação de Padrões Espectrais em Depósitos Minerais: Uma Aplicação nas Minas de Camaquã/RS, Brasil*. Dissertação de Mestrado (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - UFRGS, Porto Alegre.
- Bongiolo, E. M. (2002). *Mineralização de Ouro na região de Lavras do Sul/ RS e Aletração Hidrotermal associada*. Dissertação de Mestrado (Dissertação de mestrado em Geociências)-UFRGS, Porto Alegre,RS.
- Bongiolo, E. M. (2006). *Integração de dados mineralógicos, isótopos estáveis (O, H) e porosidade de rochas (14C-PMMA) no reconhecimento da evolução da alteração no sistema hidrotermal de Lavras do Sul/RS, Brasil*. Tese de Doutorado (Tese de Doutorado em Geociências)- UFRGS e Université de Poitiers, Porto Alegre.
- Bongiolo, E. M., Patrier-Mas, P., Mexias, A. S., Beaufort, D., & Formoso, M. L. (Abril de 2008). Spatioal and Temporal Evolution of Hydrothermal Alteration at Lavras do Sul, Brazil: Evidence from Dioctahedral Clay Minerals. *Clays and Clay Minerals*, 56(2), 222–243.
- Bongiolo, E. M., Renac, C., Mexias, A. S., Gomes, M. B., Ronchi, L., & Patrier-Mas, P. (September de 2011). Evidence of Ediacaran glaciation in southernmost Brazil through magmatic to meteoric fluid circulation in the porphyry–epithermal Au–Cu deposits of Lavras do Sul. *Precambrian Research*, 189(Issues 3-4), 404-419.
- Borba, A. W. (2006). *Evolução geológica da "Bacia do Camaquã" (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-rio-grandense, RS, Brasil): uma visão com base naintegração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica*. Tese de Doutorado (Tese de Doutorado em Geociências, ênfase em Estratigrafia)- UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Camozzato, E., Klein, C., & Iglesias, C. M. (2014). *Folha SH.21-Z-D-III Bagé: carta geológica, escala 1:100.000*. CPRM, Porto Alegre.
- Chemale Jr., F. (2000). Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense. Em M. Holz, & L. De Ros, *Geologia e Estratigrafia do Rio Grande do Sul* (pp. 3-44). Porto Alegre, RS: Gráfica da UFRGS.
- Clark, R. N. (1999). Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. Em A. N. Rencz, *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing* (3 ed., Vol. 3, pp. 3-58). New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Crósta, A. P. (1992). *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Campinas, SP: Instituto de Geociências- UNICAMP.
- Crósta, A. P., Ducart, D., & Souza Filho, C. (2009). Mineral Exploratio for Epithermal Gold in Northern Patagonia, Argentina: From Regional- to Deposit-Scale Prospecting Using Landsat TM and Terra ASTER. *Reviews in Economic Geology*, 16, 97-108.
- Ducart, D. F. (2007). *Alteração hidrotermal do prospecto aurífero Cerro La Mina, Los Menucos, Patagônia, Argentina: Geologia, Sensoriamento Remoto e Isótopos Estáveis*. Tese de Doutorado(Tese de Doutorado em Geociências)- UNICAMP, Campinas, SP.

- Ducart, D., Crósta, A. P., & Souza Filho, C. (2005). Mapeamento de alteração hidrotermal no distrito Los Menucos, Argentina, por meio de imagens multiespectrais ASTER. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* (pp. 4057-4064). Goiânia, GO: INPE.
- Evans, A. M. (1993). *Ore Geology and Industrial Minerals: An Introduction* (3 ed.). New York: Blackwell Publishing.
- Frizzo, T. C. (2002). *Zoneamento da vegetação e sua relação com metais na mina Volta Grande, Lavras do Sul, Rs*. Dissertação de mestrado (Dissertação de mestrado em Ecologia)-UFRGS, Porto Alegre.
- Gastal, M. d., & Lafon, J. M. (Março de 2006). Reinterpretação do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS, de acordo com os sistemas vulcano-plutônicos de subsidência. Parte 2: Química Mineral, Geoquímica e Isótopos de Pb-Sr-Nd. *Revista Brasileira de Geociências*, 36, 125-146.
- Gastal, M. d., & Lafon, J. M. (Março de 1998). Gênese e evolução dos Granitóides metaluminosos de afinidade alcalina da porção Oeste do Escudo Sul-rio-grandense: Geoquímica e Isótopos de Rb-Sr e Pb-Pb. *Revista Brasileira de Geociências*, 28, 11-28.
- Gastal, M. d., Ferreira, F. F., Cunha, J. U., Esmeris, C., Koester, E., Raposo, M. B., & Rossetti, M. d. (Junho de 2015). Alojamento do granito Lavras e a mineralização aurífera durante evolução de centro vulcano-plutônico pós-colisional, oeste do Escudo Sul-riograndense: dados geofísicos e estruturais. *Brazilian Journal of Geology*, 45(2), 217-241.
- Gastal, M. d., Lafon, J. M., Ferreira, F. F., Magro, F. S., Remus, M. D., & Sommer, C. (Março de 2006). Reinterpretação do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS, de acordo com os sistemas vulcano-plutônicos de subsidência. Parte 1: Geologia, Geofísica e Geocronologia (207Pb/206Pb e 206Pb/238U). *Revista Brasileira de Geociências*, 36, 109-124.
- Hartmann, L. A., Chemale Jr., F., & Phillip, R. (2007). EVOLUÇÃO GEOTECTÔNICA DO RIO GRANDE DO SUL NO PRÉ-CAMBRIANO. Em R. Iannuzzi, & J. C. Frantz, *50 anos de Geologia: Instituto de Geociências UFRGS* (pp. 97-123). Porto Aletre, RS: UFRGS.
- Hartmann, L., Lopes, A., Wang, Y., Liu, D., & Vasconcellos, M. (2003). *Oceanic plateau accretion at 705 Ma in the southern Brazilian Shield*. 4th South American Symposium on Isotope Geology. Salvador: Short papers vol 1 p. 178.
- Hasui, Y. (2012). Sistema Orogênico Mantiqueira. Em Y. Hasui, C. D. Carneiro, F. M. Almeida, & A. Bartorelli, *Geologia do Brasil* (pp. 331-372). São Paulo: Beca.
- Hedenquist, J. W., & White, N. C. (1996). Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration. *Resource Geology*(1), pp. 1-18.
- Kafino, C. V. (2009). *Estudo da composição e distribuição da alteração hidrotermal do Cerro Águas Calientes, Salta, Argentina, a partir de imagens do sensor ASTER*. Dissertação de mestrado (Dissertação de mestrado em Geociências)-UNB, Brasília, DF.
- Laux, J. (2017). *Geologia e recursos minerais da folha Lagoa da Meia Lua, SH.21-Z-B-VI: estado do Rio Grande do Sul*. CPRM, Porto Alegre.

- Lima, B. E. (2003). *Avaliação das Imagens do Sensor ASTER para Discriminação Espectral de Variações Faciológicas no Granito Serra Branca, Estado de Goiás*. Dissertação de Mestrado(Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto)-INPE, São José dos Campos.
- LP DAAC. (2014). https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/aster/aster_products_table/ast_l1t. Acesso em 28 de Dezembro de 2017, disponível em LP DAAC - Land Processes Distributed Active Archive Center.
- Machado, N., Koppe, J., & Hartmann, L. (1990). A late Proterozoic U-Pb age for the Bossoroca Belt, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 3, pp. 87-90.
- Markoski, P. R. (2006). *Avaliação de imagens do sensor ASTER para caracterização e mapeamento de rejeitos de garimpos de ametistas*. Dissertação de mestrado (Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto) -UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Meneses, P. R. (2012). Principios de Sensoriamento Remoto. Em P. R. Meneses, & T. de Almeida, *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto* (pp. 1-33). Brasília: UNB.
- Meneses, P. R., & Almeida, T. (2012). Transformação por Rotação Espectral. Em P. R. Meneses, & T. Almeida, *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto* (pp. 154-167). Brasília: UNB.
- Meneses, P. R., & de Almeida, T. (2012). Transformação por Rotação Espectral. Em P. R. Meneses, & T. de Almeida, *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto* (pp. 154-167). Brasília: UNB.
- Milani, E. J., Melo, J. G., Souza, P. A., Fernandes, L., & França, A. B. (Novembro de 2007). Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15(2), 265-287.
- NASA. (2004). <https://asterweb.jpl.nasa.gov/about.asp>. Acesso em 26 de Dezembro de 2017, disponível em ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.
- NASA. (2014). <https://terra.nasa.gov/science>. Acesso em 26 de Dezembro de 2017, disponível em TERRA The EOS Flagship.
- NASA. (01 de Abril de 2016). <https://www.nasa.gov/feature/jpl/nasa-japan-make-aster-earth-data-available-at-no-cost>. Acesso em 26 de Dezembro de 2017, disponível em NASA.
- Paim, P. S., Chemale Jr., F., & Wildner, W. (2014). Estágios evolutivos da Bacia do Camaquã (RS). *Ciência e Natura*, 36(Especial), 183–193.
- Pereira, J. G. (2011). *Contribuição ao estudo geológico da Bacia do Camaquã- RS, através de modelagem aeromagnética 2,5D*. Dissertação de Mestrado(Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Meteorologia)- UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Philipp, R. P., Pimentel, M. M., & Chemale Jr., F. (Junho de 2016). Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. *Brazilian Journal of Geology*, 46(Suppl 1), 83-104.

- Philipp, R., & Machado, R. (2002). Ocorrência e significado dos septos do embasamento encontrados nas suítes graníticas do batólito Pelotas, RS, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 29(1), pp. 43-60.
- Porcher, C., & Lopes, R. d. (2000). *Cachoeira do Sul: folha SH.22-Y-A: estado do Rio Grande do Sul, Escala 1:250.000*. CPRM. Brasília: Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.
- Ramgrab, G., & Wildner, W. (1999). *Pedro Osório, Folha SH.22-Y-C: Estado do Rio Grande do Sul, Escala 1:250.000*. CPRM. Brasília: Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil .
- Robb, L. (2005). *Introduction to Ore-Forming Processes* (1 ed.). Malden, USA: Blackwell Publishing.
- Santos, P. R., Seoane, J. S., Fernandes, M. d., & de Oliveira, D. (2010). Integração e análise de imagens ASTER e IKONOS para identificação de sítios de exploração mineral com características de alterações hidrotermais. *Revista Brasileira de Cartografia, Especial* 2(62), 345-362.
- Seoane, J. C., Castro, N. A., Osako, L. S., & Baars, F. J. (September de 2009). Multispectral Imagery Applied to Nickel Laterite Exploration: The Conceição do Araguaia Discovery. *Reviews in Economic Geology*, 16, 109–122.
- Travassos, R. P. (2014). *Interpretação Estrutural Regional do Escudo- Sul-Rio-Grandense- Rio Grande do Sul- Brasil, com base em Aeromagnetometria*. Brasília, DF.
- Viana, R. P. (2012). *Análise de imagem ASTER para seleção de alvos de alteração hidrotermal mineralizados a ouro*. Trabalho de Conclusão de Curso (Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia)- UFRJ, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Rio de Janeiro.
- Wahi, M., Taj Eddine, K., & Laftouhi, N. (2013). ASTER VNIR & SWIR Band Enhancement for Lithological Mapping - A case study of the Azegour Area (Western High Atlas, Morocco). *Journal of Environment and Earth Science*, 3(12).

ANEXOS

Mineralizações no CILS						
PARTE I						
Fácies Shoshoníticas						
Mina	Encaixante	Alteração	Minério	Tipo	Teores	Características
Caneleira	Granodioritos a monzogranitos	Principal: quartzo, clorita, mica branca, pirita, epidoto e carbonatos; Subordinada: calcopirita, galena, molibdenita, esfalerita, bornita, arsenopirita e pirrotita.	Au	Filão de quartzo predominantemente para NW e E-W	1,0 ppm	Veio descontínuo com 500m de comprimento e 20cm de espessura média.
Olaria					1,0 ppm	Veio com 200m de comprimento e 60cm de espessura média.
Pitangueira					0,9 ppm	Veios descontínuos com 200m de comprimento e 50cm de espessura média.
Virgínia					0,8 ppm	Veio de comprimento desconhecido e 30cm de espessura.
Cerritos					1,8 ppm	Veio com 170m de comprimento e 2m de espessura média. A partir de testemunhos de sondagem, foram identificados "bolsões" com 30m de espessura
Paredão					0,7 ppm	Veios com 20m de comprimento e 40cm de espessura média.
São José					0,4 ppm	Veios descontínuos com 200m de comprimento e 90cm de espessura média.
Santo Expedito					0,3 ppm	Veio com 3,5m de comprimento e 20cm de espessura.
Taruman					0,4 ppm	Veio com 500m de comprimento e 50cm de espessura.

Mineralizações no CILS						
PARTE II						
Fácies Alcalinas						
Mina	Encaixante	Alteração	Minério	Tipo	Teores	Características
Aurora	Sieno-granitos	Principal: clorita, quartzo, mica branca, pirita, calcopirita epidoto e calcita; Subordinada: galena, molibdenita, esfalerita, bornita, arsenopirita, pirrotita e óxidos de manganês (Mato Feio); Associada: veios de actinolita contendo pirita, quartzo, calcita, dolomita, turmalina, titanita, alanita, magnetita e fluorita.	Au	Filão de quartzo predominantemente para NW, NE e E-W. O Bloco Butiá apresenta também disseminado em "lentes"	0,4 ppm	Veios com 50m de comprimento e 20cm de espessura média.
Doura da					0,8 ppm	Veios com 150m de comprimento e 15cm de espessura média.
Mato Feio					1,0 ppm	Veio descontínuo com 290m de comprimento e 20cm de espessura média.
Bloco do Butiá	Pertita Granitos	Principal: clorita, mica branca, pirita e titanita; Subordinada: galena, molibdenita, esfalerita, calcita e quartzo			0,7 ppm e 2,5 ppm (oxidado).	Disseminações de até 40m de espessura. Quando observados, os veios têm entre 5-40 cm de espessura.
Galvão		Principal: clorita, quartzo, mica branca e pirita; Subordinada: galena e calcopirita.			1,0 ppm	Veios com 85m de comprimento e 50cm de espessura média.
Valdo Teixeira		Principal: clorita, quartzo, mica branca, pirita e calcopirita; Subordinada: galena, arsenopirita e esfalerita.			2,0 ppm	Veios descontínuos com 100m de comprimento e 40cm de espessura média.
Zeca Souza		clorita, quartzo, mica branca, pirita e epidoto.			1,6 ppm	Veios com 75m de Comprimento e 90cm de espessura média

Mineralizações no CILS						
PARTE III						
Sequência Vulcanogênica						
Formação Hilário						
Mina	Encaixante	Alteração	Minério	Tipo	Teores	Características
Cerro Rico	Predominam tufos a cristal, subordinadamente intercalados com rochas sedimentares com constituintes de origem vulcânica (NE)	quartzo, pirita, calcopirita, arsenopirita, especularita, calcocita, bornita, azurita, clorita, calcita, anfibólios e óxidos de manganês	Au e Cu (Ag) Volta Grande	Filões, Veios e Stockworks de quartzo, carbonatos, pirita e calcopirita, predomínio para N-W e NE	4,0 ppm	Veios com 120m de comprimento e 50cm de espessura média
Saraiva	Tufos líticos e a cristal, lavas de traqui-andesitos e rochas vulcanoclásticas. Corpos hipabissais monzoníticos	quartzo, pirita, calcopirita e especularita		Filões, Veios e Stockworks de quartzo pirita e calcopirita, predomínio para N-W	4,0 ppm	Veios descontínuos com 15m de comprimento e 20cm de espessura média.
Volta Grande	Tufos líticos e a cristal, lápili tufos, aglomerados e brechas piroclásticas, intercalados com lavas de traquibasaltos e traquiandesitos e depósitos epiclásticos. Diques e corpos subvulcânicos intermediários a ácidos	quartzo, calcita, dolomita, pirita, calcopirita, epidoto, clorita, galena, actinolita, especularita, bornita, calcocita e arsenopirita		Filões, Veios e Stockworks de quartzo, calcita, dolomita, pirita e calcopirita, predomínio para N-W	3,5 ppm	Veios com 20m de comprimento e 20cm de espessura média

ANEXO A: Tabela com mineralizações do Complexo Intrusivo Lavras do Sul. Modificada de Bongioiolo (2002)